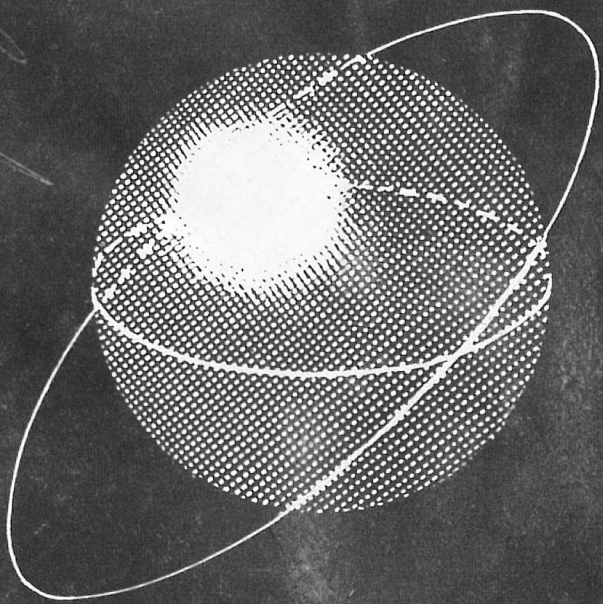
52
П245 физ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АСТРОНОМИЯ

К.-К. Пекер



L'ASTRONOMIE EXPÉRIMENTALE

par
Jean-Claude Pecker

PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE
1969

Ж.-К. ПЕКЕР

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АСТРОНОМИЯ

Перевод
В. М. РУДАКОВА

Под редакцией
А. А. ОРЛОВА

ЗАЛ
ФИЗ.-МАТЕМАТ.
ЛИТЕРАТУРЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
МОСКВА 1973

УДК 52

Гос. публичная научно-техническая библиотека СССР
ЭКЗЕМПЛЯР
ЧИТАЛЬНОГО ЗАЛА
73-23324

Эта небольшая книга написана крупным французским астрофизиком, профессором Сорбонны Жаном-Клодом Пекером. В увлекательной, доступной широким кругам читателей форме автор рассказывает о той революции, которую вызвало появление космических аппаратов и ракет, превративших наблюдательную науку астрономию в экспериментальную. Автор начинает с рассказа об искусственных небесных телах, позволивших проводить астрономические эксперименты в масштабах солнечной системы, знакомит читателя с многообразными связями «земной» и «космической» астрономии, описывает прямые исследования тел солнечной системы и заканчивает поисками форм внеземной жизни.

Книга рассчитана на широкие круги читателей, прежде всего на школьников старших классов, участников физических и астрономических кружков.

Редакция космических исследований, астрономии и геофизики

© Перевод на русский. Издательство «Мир», 1973

П $\frac{0269-119}{041(01)-73}$

ОТ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Есть книги, название которых лучше говорит о времени, в котором эта книга увидела свет, чем дата ее издания. Само название книги видного французского астрофизика Жана-Клода Пекера — «Экспериментальная астрономия» — свидетельствует о том, что книга написана в эру освоения космоса, открытую 4 октября 1957 г. запуском первого в истории человечества советского искусственного спутника Земли.

Сам факт вывода на орбиту небесного тела предмета, созданного руками человечества, не может не оказать мощного влияния не только на науку и научную общественность, но и на все человечество, на взгляды человека на мир, космос, вселенную.

После вывода измерительных приборов сначала в околоземное, а затем и в межпланетное пространство, астрономы получили возможность гораздо полнее исследовать небесные тела, чем со «дна» земной атмосферы. Прямые же исследования Луны, Венеры и Марса — как людьми, так и автоматическими станциями — окончательно придали астрономии в глазах неспециалистов статут экспериментальной науки.

Но действительно ли астрономия, старейшая наука о природе, была до начала космических исследований чисто наблюдательной наукой, а астрономы занимались лишь фиксацией разрозненных фактов о небесных телах, никак не вмешиваясь в неизменный порядок на небесах? Действительно ли между астрономией и всеми другими естественными науками лежала непроходимая пропасть в методологии? (Вопрос этот имеет, между прочим, важное мировоззренческое значение.) Именно с этой проблемы начинает свою книгу автор. Познакомив

читателей с суждениями об астрономии, принадлежащие небезызвестному Огюсту Конту, Пекер показывает, как представление о чисто наблюдательном характере астрономии с неизбежностью приводит Конта к выводу о принципиальной невозможности для человека узнать химический состав небесных тел — выводу, опровергнутому открытием спектрального анализа еще при жизни Конта. Стало быть, даже классическая астрономия не чисто наблюдательная наука? Да, — утверждает Пекер, — и на примере проблемы определения температуры Солнца показывает, что астроном в своей повседневной работе постоянно соприкасается с экспериментом, активно воздействуя на объект исследования — хотя и специфическим, характерным именно для астрономии способом.

Но тогда в чем же «соль» заглавия книги, раз астрономия всегда была «экспериментальной»? Ответ на этот вопрос дает сама книга.

Количественные изменения перерастают в качественные, и создание искусственных небесных тел, дало такое развитие «экспериментальной» части астрономии, что эта наука по существу переживает в настоящее время подлинную революцию и выходит на передний край прогресса науки. Вот этой новой роли эксперимента в астрономии, которая открывает перед древнейшей наукой возможности на основе уже имеющихся данных гораздо более полно исследовать природу небесных тел — Земли, Луны, Солнца, планет, а затем и более удаленных объектов — и посвящена книга Пекера. Мысль о тесной связи «земной» и «космической» астрономии красной нитью проходит через всю книгу — при обсуждении движения спутников Земли и природы Луны, результатов изучения Венеры и Марса и попыток обнаружения сигналов внеземных разумных существ. К этой же мысли автор еще раз возвращается в заключении.

Книга Пекера посвящена увлекательной теме. Ее с интересом прочтут те, кто увлечен наукой вообще, и наукой о небе в особенности. Но особенно полезна она будет тем, перед кем стоит задача выбора дела жизни — школьникам старших классов и молодежи, ибо новая

астрономия, как и любая новая наука, ждет молодых сил.

Космические исследования, а вместе с ними и астрономия, развиваются весьма интенсивно. Поэтому часть фактического материала, приводимого в книге, неизбежно устаревает. Особенно это касается исследования Луны, Марса и Венеры. Однако цель, поставленная автором — проследить новые *направления* исследования — от этого не пострадала. Это дало возможность ограничиться рядом примечаний, отсылая читателя, желающего более подробно ознакомиться с новыми фактами, к литературе в конце книги, составленной с учетом доступности ее советскому читателю.

Перевод книги осуществлялся с переработанного автором английского издания 1970 г. и был сверен с французским изданием 1969 г. с целью максимального приближения к языку и стилю оригинального издания.

А. А. Орлов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сократ знал все, что было известно его современникам. Но уже в средние века одному человеку было трудно иметь действительно энциклопедические сведения о всех областях человеческих знаний. Конечно, Пикко делла Мирандола, Пий II, Леонардо да Винчи и другие выдающиеся умы владели обширными и глубокими знаниями; они знали все, что можно было знать, разумеется за исключением некоторых специальных вопросов. Энциклопедисты XVIII в. должны были довольствоваться по существу обзорами, а их деятельность была коллективной: специальные знания каждого из сотрудников компенсировали неполноту знаний остальных. Мы очень хорошо знаем, что современная наука есть наука специалистов. Одному ученому невозможно не только усвоить всю сумму человеческих знаний, невозможно даже досконально изучить свою собственную дисциплину. Каждый год научные издательства выпускают в свет пугающее количество печатных работ. Даже в очень узких областях науки чуть ли не ежедневно возникают новые журналы, посвященные зачастую крайне специальным проблемам.

Совершенно очевидно, что в области науки, поле деятельности которой значительно шире поля астрономических и астрофизических исследований, невозможно быть обо всем информированным сколько-нибудь полно, даже если иметь под рукой самую богатую библиотеку мира. Кроме того, темп прогресса растет, и по мере его роста все более важным становится чисто человеческий фактор времени, которым читатель руководствуется при знакомстве с плодами авторских трудов. Нетрудно понять, к чему я клоню: эта книга не претендует ни на

энциклопедичность — что невозможно, — ни на то, чтобы быть, как говорится, на самом современном уровне. Через некоторое время после ее выхода из печати она будет претендовать на это еще меньше. Кроме того, за исключением кое-каких разделов, трудно внести что-либо действительно новое: в подобной книге доказательства и примеры не могут быть чересчур оригинальными; что касается других авторов, чьи работы были — совершенно сознательно — использованы, то автор может лишь просить у них прощения. При подготовке отдельных глав не делалось попытки дать полную библиографию: протянута лишь нить, подобная нити Ариадны, через лабиринт плотно заставленных книгами библиотечных полок. Поступая таким образом, автор надеется (возможно, немного эгоистично, поскольку автор сейчас вне этого лабиринта), что молодые ученые, читая эту книгу, найдут способ защититься от минотавров (а их легион), с которыми они встретятся здесь. К тому же — увы! — им предстоит защищаться и от многих других чудовищ.

Спокойное и плодотворное размышление — что от него остается в переполненных сотрудниками лабораториях, в шуме вычислительных машин, которые являются нашими рабами меньше, чем мы — их, в массе данных и требований все более высокой точности? Что от него остается перед лицом таких фактов, как водородная бомба, полет на Луну, недоедание в Индии, война во Вьетнаме? Что остается от него, когда неумолимое сокращение расстояний и разрушение любых барьеров еще более остро поставило вопрос о солидарности всего человечества, от которого мы не можем уклониться? Молодые ученые не вправе забывать, что наука может служить не только добру, но и злу. А тому, кто собирается заняться космическими исследованиями, следует это осознать лучше, чем большинству людей.

Тем не менее автору казалось, что в этой небольшой книге * ему удалось изложить чисто научные обоснования космических исследований. Хотя такая книга может служить лишь введением, молодым астрономам-

* И в другой книге того же автора «Les observatoires spatiaux»,

исследователям стоит познакомиться с ней для того, чтобы приобрести уверенность в этой области науки, по многим причинам столь привлекательной. Безусловно, если иметь в виду специалистов, то они пока не могут сказать, что астрономия слишком много выяснила с помощью ракет, спутников и космических аппаратов. Но завоевание космоса открывает перед наукой о небе огромные возможности, и даже сравнительно скромных средств при правильном расходовании будет достаточно для резкого увеличения астрономических знаний.

По указанным выше причинам и для того, чтобы оставаться строго в рамках, очерченных названием книги, я умышленно не касаюсь вопросов техники. Здесь нет ничего о реактивном движении, очень немного — о навигации, и лишь самое необходимое (для понимания проблем, стоящих перед астрономами) — из геофизики. Я попытался прежде всего показать, что может дать само существование космической техники астрономам и что астрономы могут требовать от нее. Нет никаких сомнений, что эти возможности и требования тесно связаны с техническим прогрессом, но я считал необходимым упоминать об этом лишь от случая к случаю: нужные работы читатель найдет в списке литературы в конце книги.

Возможно, вы тогда спросите: «Зачем же написана такая книга?»

На столь прямой вопрос я вынужден дать ответ. Разумеется, я бы не сказал, что эта книга отвечает внутренней потребности (я предпочитаю тихое размышление и спокойное исследование) или внешней (конечно, постройка дачи требует денег, но стоит ли говорить об этом?). Я просто попытался высказать здесь свою точку зрения (по крайней мере таков был замысел); я попытался кое-что объяснить (избегая, насколько возможно, ошибок); я попытался также пробудить размышления молодых специалистов; я попытался, кроме того, обратить внимание на те проблемы космических исследований, которые я считаю важными (вполне возможно, что я при этом ошибаюсь, но, думаю, ненамного) и которые еще долго будут оставаться в центре внимания.

Я не старался ни учить, ни подменять солидные руководства, стремился лишь вызвать и поддержать интерес. Я понимаю, что не все мне удалось; однако если читатель остался неудовлетворенным, но у него благодаря моей книге возникло любопытство и он захотел прочесть другие работы по этому предмету и удовлетворить свое любопытство, тогда по крайней мере я утешусь тем, что лучше пойму недостатки своей книги.

ГЛАВА I

АСТРОНОМИЯ — ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ НАУКА?

1. Огюст Конт и астрономия

Философам XIX в., пытавшимся понять закон (или законы) человеческого сознания, астрономия — наука о естественном мире и вместе с тем вершина абстракции — представлялась особо привилегированной отраслью знания.

Огюст Конт писал:

«Поскольку астрономические явления суть самые общие, наиболее простые и абстрактные, очевидно, натуральная философия должна начинаться с их изучения, так как законы, управляющие ими, влияют на законы всех других явлений, от которых они сами, напротив, совершенно не зависят».

Далее он добавлял:

«Необходимо четко различать небесную физику и земную физику и приступать к изучению последней только после изучения первой, образующей основу».

По правде говоря, подобные высказывания выглядели весьма сомнительными уже в эпоху Огюста Конта; тем не менее даже в последнее время кое-кто мог написать (несомненно, скорее из чувства иронической ностальгии, чем из объективных соображений, однако же не без серьезных причин), что астрофизика «...возможно, даже охватила бы все физические науки, поскольку астрофизическая лаборатория — наиболее полная и обширная — включает в себя все земные лаборатории и превосходит их...».

Впрочем, второе высказывание О. Конта, дополняющее первое, также было сомнительным с самого начала. Являясь идеальным примером естественной науки, астрономия была также превосходным полем применения математики, науки в высшей степени абстрактной.

«Не существует ни одного аналитического метода, ни одной теоремы геометрии или механики, которые бы не нашли в настоящее время применения в астрономических исследованиях. Вот почему наука о небесных телах должна быть вершиной в системе наших знаний о природе.

Она заслужила также звание первой науки потому, что в ней изучаются законы, имеющие фундаментальный характер. Я всегда считал истинным проявлением философского гения Ньютона название его основополагающего труда по небесной механике: Philosophia naturalis principia mathematica (Математические начала натуральной философии). Таким образом он чрезвычайно энергично и лаконично указал, что основные законы небесных явлений составляют фундамент всей системы наших знаний. Можем ли мы с действительно научной точки зрения рассматривать какое-либо земное явление, не учитывая прежде всего того, что представляет собой Земля во вселенной, частью которой мы являемся, поскольку ее положение и движение должны по необходимости оказывать преобладающее влияние на все явления, происходящие на ней. Что стало бы с нашими физическими теориями, а следовательно, и с теориями химическими, физиологическими и т. д. без фундаментального всеохватывающего понятия всемирного тяготения?»

Впрочем, Конт в своем энтузиазме игнорировал (а в приступах позитивизма он это делал сознательно) возможное развитие астрономии, но мы сейчас воочию знаем, до какой степени оно было и будет гигантским! Он утверждал:

«...Эта общность, эта простота и этот абстрактный характер являются результатом условий нашего расположения относительно небесных тел: все астрономические исследования должны в итоге сводиться к визуальным наблюдениям. Таким образом, звезды выделяются из всех объектов природы тем, что их можно изучать при наименее меняющихся условиях. Мы допускаем, что существует возможность определить их форму, расстояния, размеры и движение; вместе с тем, не существует способа, с помощью которого мы можем даже надеяться

изучить когда-либо их химический состав, минералогическую структуру и тем более природу живых существ, обитающих на их поверхности. Наши позитивные знания в отношении небесных тел по необходимости ограничиваются их геометрическими и механическими свойствами, но мы абсолютно не в состоянии со всеми нашими многообразными наблюдательными средствами изучить другие свойства: физические, химические, физиологические и тем более социальные явления, относящиеся к предполагаемым существам».

Я надеюсь, что мне можно простить столь длинное цитирование Конта. Но его позиция в течение века — слишком длинного века! — приводила к тому, что астрономия должна была укладываться в жесткие рамки его системы, и сколько астрономов — увы! — продолжали (особенно во Франции) занятия устаревшей астрономией, движимые более или менее сознательно идеей a priori, что аргументы Огюста Конта абсолютно разумны!

Однако, хотя астрономия и не играла той роли, которую столь категорически отвел ей Конт, совершенно ясно, что астрономия по своим методам получения информации о реальном мире существенно отличается от других наук. Это не экспериментальная, а скорее пассивная, наблюдательная наука.

Превосходно сказал об этом Клод Бернар:

«Сначала астроном проводит наблюдения, а затем размышляет над ними с тем, чтобы извлечь из них какие-либо предположения, которые он затем проверяет дальнейшими наблюдениями в подходящих условиях... В сущности, точно так же обстоит дело и в любой другой науке. Во всех областях науки ученые хотят приблизиться к знанию законов явлений для того, чтобы иметь возможность предсказывать эти явления или управлять ими. Несмотря на то, что астрономия предсказывает движение небесных тел и извлекает из этого массу практических рекомендаций, она не может изменить протекание небесных явлений путем эксперимента, как это могут сделать в своей области химики и физики».

В эпоху Клода Бернара так же (или казалось, что так же!) обстояло дело и с биологией. Обратимся еще раз к словесным витийствам Огюста Конта:

«Можно было бы теперь задать себе вопрос, почему наука астрономия кажется более тесно связанной с биологией, чем с физикой или химией. Это происходит вследствие того, что, несмотря на несомненную необходимость физики и химии, астрономия и биология благодаря особой своей природе составляют две главные ветви собственно натуральной философии. Эти две великие науки, взаимно дополняющие друг друга, в своей рациональной гармонии охватывают общую систему наших основных представлений. В одной предметом является вселенная, в другой — человек: пределы, между которыми всегда будут оставаться объекты наших размышлений. Вначале вселенная, потом человек — таково в чисто теоретическом плане положительное направление познания, хотя в непосредственно практическом плане оно должно быть изменено на обратное. Так как законы вселенной управляют человеческими законами, люди не могут их изменить. Между этими двумя взаимосвязанными полюсами натурфилософии располагаются, с одной стороны, законы физики в качестве дополнения к законам астрономии, с другой — химические законы, непосредственно предшествующие законам биологии. Таков с самой возвышенной философской точки зрения нерушимый рациональный спектр фундаментальных наук».

Тот факт, что человек не имеет возможности воздействовать на явления астрономического масштаба, придававший астрономии величие, в представлении Конта выглядел следующим образом:

«Это явное и неоспоримое превосходство науки астрономии при первом же систематическом применении позитивных взглядов полностью согласуется с историческим влиянием этой науки, до сих пор являющейся двигателем великих интеллектуальных революций. В самом деле, первое представление о постоянстве законов природы должно было развиться именно из наблюдений простейших и наиболее общих явлений, строгая регулярность и величественное течение которых для нас яв-

ляется примером реального порядка, полностью независимых от каких-либо действий человека».

Оценивая влияние развития наших знаний о небе на общее историческое развитие, Конт продолжает:

«Задолго до того, как упомянутые представления обрели сколько-нибудь научный характер, они сыграли решающую роль в имеющем важное значение переходе от фетишизма к политеизму, который повсюду родился из культа звезд. В дальнейшем первые космологические теории философских школ Фалеса и Пифагора имели своим основным психологическим источником упадок политеизма и подъем монотеизма. Наконец, систематический рост современного позитивизма, постепенно становящегося новой философией, в значительной степени определяется революцией в астрономии, вызванной Коперником, Кеплером и Галилеем».

Действительно ли человек не способен воздействовать на астрономические явления? Что можно сказать об этом? Биологические эксперименты стали привычным делом уже давно. Задолго до Конта могли ли быть простыми наблюдателями античные земледельцы или голландские цветоводы, выращивающие невиданные тюльпаны? А опыты Левенгука с живородящими тлями? А хирурги, начиная хотя бы с Амбуаза Парэ? Аптекари? Индийские жрецы, узнавшие на себе и использовавшие на других галлюциногенные свойства сока некоторых кактусов — пейотля и мескалина? Лавуазье и дыхание, Гальвани и сокращение мышц под действием тока? Сам Клод Бернар? Без экспериментов прогресс медицины был бы невозможен.

Но то же справедливо и для астронома. Странное привилегированное положение единственной науки о природе, никак не связанной с экспериментом, в значительной мере является недоразумением.

2. Наблюдатель — еще и экспериментатор

Тезис, высказанный в заголовке, вполне законен. В действительности любое наблюдение не является целиком пассивным. Данные, которые через многочисленные

Гос. публичная

промежуточные инстанции попадают к наблюдателю и дают ему сведения о наблюдаемом объекте, по-разному учитываются им. Наблюдатель может отобрать часть информации — ту, которая ему требуется для изучения той или иной величины, представляющейся ему существенной для изучаемого явления (этот выбор может быть правильным или ошибочным, и часто тем и другим одновременно, что определяется прежде всего уровнем развития науки) — в данный ли момент или для будущих исследований. Наблюдатель не только может выбрать способ наблюдения, но в его власти также приспособить прибор для тех измерений, которые он считает нужным сделать. Он может повторить измерения столько раз, сколько потребуется.

На самом деле масса возможных данных является (при совершенствовании аппаратуры) бесконечным источником подлинного экспериментирования. Давайте рассмотрим простой пример — определение температуры Солнца. Пусть наш астроном примет сначала, что Солнце имеет определенную температуру — это будет исходной гипотезой.

Наш астроном начнет со знакомства с существующей литературой по интересующему его вопросу и изучит приборы, применяемые для измерения температуры различных тел в физических лабораториях. Разумеется, он немедленно убедится, что не существует ни одного типа термометра, которым он мог бы воспользоваться, но он узнает, что излучение, испускаемое нагретыми телами, связано с их температурой экспериментальным законом (закон излучения абсолютно черного тела), теоретически подтвержденным Планком. Отсюда наш наблюдатель сможет прийти к первой идее: измерить суммарную интенсивность солнечного излучения («солнечную постоянную»). Учет расстояния до Солнца даст величину «эффективной температуры» светила. Так называется температура черного тела, излучающего с квадратного сантиметра поверхности столько же энергии, сколько излучает Солнце.

Преодолев трудности измерения солнечной постоянной, мы получим значение эффективной температуры: $T_{эфф} = 5807°$ (с точностью $\pm 30°$). Однако астроном

имеет веские основания считать, что Солнце не вполне обладает свойствами абсолютно черного тела. И именно здесь на сцену выходит эксперимент. Если бы Солнце было абсолютно черным телом, его «цветовая температура», полученная при сравнении интенсивности его излучения на двух длинах волн (например, соответствующих голубой и желтой частям спектра) была бы равна 5807°. А его «яркостная температура», измеренная путем точного определения абсолютной интенсивности излучения на одной данной длине волны, также была бы равна 5807°.

Теперь легко установить, какой «эксперимент» необходимо поставить (и это будет именно *экспериментирование*): нужно изготовить прибор, который позволил бы провести измерения яркостной и цветовой температур Солнца, затем выбрать подходящие длины волн и провести измерения. В итоге наш астроном обнаружит, что температура меняется от измерения к измерению. Результаты эксперимента ясны: Солнце не является абсолютно черным телом, оно не является ни абсолютно непрозрачным, как черное тело в физике, ни изотермическим. Обнаруженные вариации температуры свидетельствуют об изменениях температуры с глубиной и прозрачности с длиной волны излучения.

Таким образом, этот первый эксперимент приводит к более сложным выводам: мы должны отвергнуть предположение о полной непрозрачности и изотермичности поверхностных слоев Солнца и предположить, что вокруг Солнца существует атмосфера; вместо одной величины — «температуры» — мы должны рассматривать «модель». Но будет ли эта модель, удовлетворяющая измерениям, в согласии с «физикой»? От одного полюса мы непрестанно возвращаемся к другому. Теория объясняет результаты измерений, а физические соображения подсказывают, что эта теория, вероятно, не сможет объяснить *все* измерения. Поэтому планируемые измерения должны быть разумно выбраны и должны быть созданы приборы, приспособленные для проведения таких измерений — а это и есть экспериментирование.

Появляются противоречия. Два следствия: физика солнечной атмосферы становится ясней, модель —

сложней. В настоящее время солнечные модели учитывают неоднородности, распределение температуры и давления (по глубине), описание полей скоростей, магнитных полей и ... я уж не знаю, что еще?

3. Численное экспериментирование

Существует и другой тип экспериментов, очень часто используемый астрофизиками. Его можно назвать численным экспериментом. По мере того как физическое описание небесного объекта становится все более и более сложным (в качестве примера возьмем снова солнечную атмосферу), может потребоваться разработка совершенно новых методов исследования. Это легко понять. Если для описания атмосферы достаточно лишь знать температуру, то необходимо лишь одно измерение; связь между результатом измерения и искомой температурой проста. Если для описания достаточно знать два значения температуры (т. е. если мы используем модель линейной зависимости температуры от какого-либо заданного параметра), то получить эти значения из наблюдений уже труднее. Каждое измерение по существу дает результат интегрирования искомых величин, являющихся функциями глубины τ, выбора исследуемой поверхности солнечного диска σ, длины волны λ и т. д. Следовательно,

$$\text{Измеренная величина} = \int_{\Delta\sigma} d\sigma \int_{\Delta\lambda} d\lambda \int_{0}^{\infty} F(\sigma, \lambda, \tau)\, d\tau. \qquad (1)$$

Обращение этих сложных интегралов, на котором основывается *любой* анализ измерений, всегда сопровождается потерей точности и является до некоторой степени неопределенной операцией. Величина F зависит от локальных физических условий: температуры, давления и т. д.

Столкнувшись с этой неточностью и неопределенностью, астрофизики вынуждены были с первых же шагов вводить теоретические «модели»: модели звезд, модели атмосфер, модели солнечных пятен, модели холодных планет и пульсирующих цефеид... В действительности это искусственные астрономические объекты, ко-

торые могли бы реально существовать, помогающие описать свойства объектов, моделями которых они являются. Эти модели представляются числовыми таблицами и абстрагированы от действительности: модель имеет гораздо меньшее отношение к солнечной атмосфере, чем математическое понятие круга — к кругу, нарисованному на листе бумаги. Для построения модели необходима законченная и достаточно детальная физическая теория и сравнительно небольшое число параметров (например, предполагаемые значения эффективной температуры, силы тяжести, химический состав звезды или других описываемых объектов). Вследствие упомянутой выше неопределенности выбор таких параметров не будет единственным.

Затем астроном, подобно химику, экспериментирующему с веществами в колбе, проводит эксперименты на вычислительной машине. Он выбирает параметры звезды и рассчитывает модель, а затем ее наблюдаемые характеристики и сравнивает их с полученными в результате измерений. Иногда, благодаря терпеливому моделированию и высокому искусству, он быстро приходит к удовлетворительной модели. Иногда же, напротив, затраченные усилия не приводят к желаемой цели; тогда он должен без долгих рассуждений рассчитать большое число моделей и выбрать из них самую подходящую. Так или иначе он получит удовлетворительное описание звезды или другого исследуемого объекта. Впрочем, иногда он даже к этому не приближается; мы имеем в виду неопределенность уравнения (1). Невозможность найти единственную удовлетворительную модель в этом случае доказывается экспериментом: единственный выход из этого положения — отбросить существующую теорию и поискать лучшую!

Впрочем, могут ли физики экспериментировать с основными объектами, которые они изучают? Не является ли это для нас лишь вопросом выбора подходящих средств и методов измерений? Мы не изменяем природы с тем, чтобы посмотреть, что из этого выйдет! Изменяем ли мы величины фундаментальных постоянных вселенной? Изменяем ли мы законы притяжения внутри атома? Как и астрономы, физики проводят эксперименты,

целесообразно планируя будущие измерения, в известном смысле оптимизируя добывание информации.

«Модели» являются инструментом не только астрономов. Существуют модели атомов, модели молекул, модели плазмы... Построены даже модели физического мира, в которых фундаментальные постоянные имеют другие значения. Гамов в своих произведениях с главным героем мистером Томпкинсом довел такие эксперименты до крайности. Например, в книге «Мистер Томпкинс в Стране Чудес» он с очаровательным юмором увеличивает постоянную Планка в 10^{27} раз, тем самым уменьшая скорость света до 15 км/ч. В этом фантастическом и восхитительном эксперименте биллиардные шары уменьшаются до размеров квантов, велосипедисты становятся плоскими, как блины, частицы газа диффундируют сквозь бамбук и вся вселенная умещается в стакане!

4. Заключение. Рождение космической астрономии

Таким образом, мне кажется, что с философской точки зрения не существует чересчур больших различий между методами астрономии и физики, а также других наук. В научной работе приходится постоянно иметь дело с необходимыми посредниками между объектом исследования и знанием о нем. Экспериментирование — это опосредствование, так как знание нельзя получить непосредственно.

Ракеты, созданные во время второй мировой войны, открыли для астрономии огромную область исследований, а спутники и другие космические аппараты позволили нам увидеть астрономию в совершенно новом свете, с широким полем для экспериментирования и возможностью избежать некоторых наиболее тягостных помех на пути между наблюдателем и светилом.

В этой небольшой книге * мы попытаемся проследить, как развитие космической техники вызвало большие надежды относительно мощного развития астрономии и до какой степени эти надежды осуществились. Область

* И в книге «Les observatoires spatiaux» того же автора.

«пересечения» астрономии и космических исследований пока еще мала, но она неуклонно растет.

Разумеется, мы начнем с разговора о прогрессе, связанном с тем фактом, что у нас теперь имеется возможность проводить эксперименты с искусственными небесными телами: спутниками, метеорами, кометами, и затем перейдем к анализу законов их движения и строения верхней атмосферы Земли.

ГЛАВА II

ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ КАК НЕБЕСНЫЕ ТЕЛА, ИЛИ ВВЕДЕНИЕ В «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНУЮ НЕБЕСНУЮ МЕХАНИКУ»

Было бы бесполезно перечислять все космические и орбитальные аппараты, запущенные начиная с 4 октября 1957 г. — даты выведения на орбиту первого советского спутника. В табл. 1 и 2 (в конце книги) перечислены

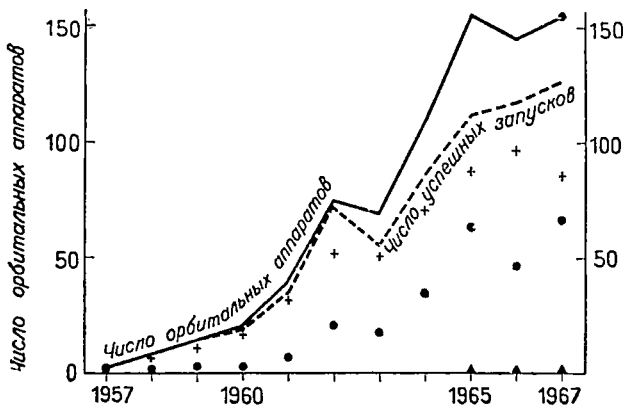


Рис. 1. Количество удачных запусков и аппаратов, выведенных на орбиты с 1957 г. За это же время весьма значительно возрос вес спутников: от 83,5 кг для «Спутника-1» (1957 г.) до 6,5 т для «Спутника-7» и затем до 126 т (ракетно-космический комплекс «Сатурн-5» — «Аполлон-4» (1967 г.). Знаками +, ●, ▲ обозначены количества спутников, выведенных на орбиты США, СССР и Францией соответственно.

лишь основные запуски, представляющие интерес для астрономии, а на рис. 1 изображен рост общего числа запусков, из которого выделены удачные. Мы не будем касаться других технических подробностей, кроме приведенных в этих таблицах и на рисунке. В последующем

будем рассматривать запущенный спутник как *астрономический объект*. Мы можем изучать его на земных обсерваториях и с помощью радиотелескопов, теодолитов, широкоугольных фотокамер и т. д. следить за его движением по траектории. Если спутник не излучает сигналов или излучает только непрерывный сигнал неизменной частоты, то мы не сможем получить непосредственно информацию о той среде, в которой он движется (в околоземном пространстве — о верхней атмосфере; в межпланетном — о радиации, приходящей из разных областей вселенной, о корпускулярном излучении Солнца или галактики, о межпланетной пыли и метеоритах). В этом случае информацию о различных силах, действующих на спутник, можно получить, только изучая его движение. Мы будем применять небесную механику к объектам, запущенным человеком с обдуманной целью; если угодно, можно говорить об *экспериментальной небесной механике*.

Из сил, действующих на спутник, укажем, прежде всего, гравитационные силы; среди них в первую очередь следует выделить силу притяжения Земли, поскольку она является преобладающей среди других гравитационных сил, влияющих на движение искусственного спутника Земли. Силы притяжения других тел и негравитационные силы лишь возмущают движение спутника в поле тяготения Земли.

1. Закон всемирного тяготения

Если предположить, что возмущения отсутствуют и масса Земли сосредоточена в одной точке (ниже мы увидим, в каких пределах это предположение справедливо), то орбитой спутника будет *эллипс* с одним из фокусов в этой точке; эллипс неподвижен в пространстве и его плоскость пересекает небесную сферу по большому кругу.

Движение спутника по этой орбите описывается законами Кеплера. Следует учесть, что семейство возможных траекторий весьма ограничено, поскольку перигей (точка орбиты, ближайшая к Земле, которая здесь считается

материальной точкой) не может находиться внутри земного шара (рис. 2).

Прежде чем приступить к изучению орбит, позвольте мне предупредить читателя: современная небесная механика — весьма сложный предмет, и я собираюсь изложить лишь некоторые ее положения, необходимые для

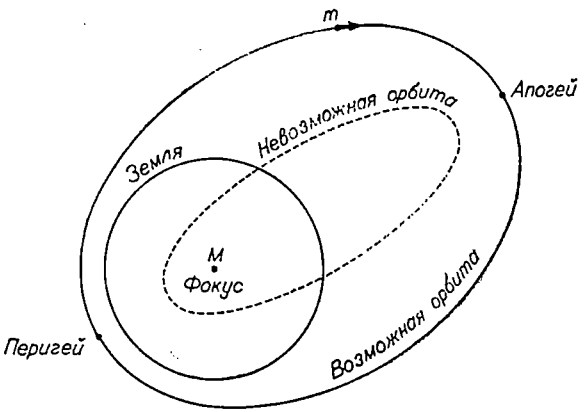


Рис. 2. Возможные и невозможные эллиптические орбиты.

понимания методов космической астрономии. Итак, начиная исследование орбит, мы должны вычислить потенциал сил тяготения и проверить основную гипотезу о том, что при подобных расчетах Землю можно считать притягивающей материальной точкой.

Мы знаем, что сила притяжения тела с массой M, действующая на тело с массой m, представляется вектором $\mathbf{F}$, направленным от массы m к массе M. Величина этой силы равна GMm/r^2; поэтому можно написать

$$\mathbf{F} = \frac{GMm}{r^2}\,\mathbf{u}, \qquad (1)$$

где $\mathbf{u}$ — единичный вектор направления от m к M, G — постоянная всемирного тяготения, r — расстояние между m и M.

Известно, что сила тяготения обладает потенциалом, т. е. в окрестности массы M эта сила зависит только от

координат выбранной точки и равна

$$\mathbf{F} = -m \operatorname{grad} V \tag{2}$$

(или $-m\nabla V$, если использовать символ «набла» вместо grad), где V — скаляр, называемый *гравитационным потенциалом* массы M, величина которого в любой точке определяется равенством

$$V = -G\frac{M}{r}. \tag{3}$$

Равенства (1) или (2) совместно с (3), выражают *закон всемирного тяготения* Ньютона. Для величины $GM_{\oplus}$ Международным астрономическим союзом в 1964 г. принято значение 398,603 км³/с ($M_{\oplus}$ обозначает массу Земли).

2. Потенциал сферического тела

Потенциал нескольких притягивающих масс, расположенных в различных точках, находится *скалярным сложением* потенциалов отдельных тел, тогда как соответствующие силы суммируются как *векторы*. Поэтому если требуется вычислить потенциал в некоторой точке или силу, действующую на тело с массой m в какой-либо точке, удобнее использовать скалярный потенциал, а не векторные силы, поскольку сложение векторов — более сложная операция, чем сложение скаляров.

Таким образом, для определения движения спутника в поле тяготения Земли (не являющейся в действительности материальной точкой) нам следует просуммировать потенциалы бесконечно малых частей притягивающего тела:

$$V = -G\int \frac{dm}{r}. \tag{4}$$

Для вычисления интеграла (4) распространенного по всему объему сферы, выберем элемент объема так, как показано на рис. 3, разбивая сферу на концентрические слои. Элемент массы равен

$$dm = \mu(R)\, R^2 \sin\theta\, d\theta\, d\varphi\, dR, \tag{5}$$

где $\mu(R)$ — масса единицы объема (плотность). Следовательно, потенциал шарового слоя толщиной dR в точке P равен

$$V = -G \int_0^{\pi} d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi\, \mu(R)\, R^2 \frac{\sin\theta}{r}\, dR. \tag{6}$$

Используя очевидное геометрическое соотношение

$$r^2 = x^2 + R^2 - 2Rx\cos\theta, \tag{7}$$

запишем

$$r\,dr = xR\sin\theta\,d\theta \tag{8}$$

и выполним интегрирование. Равенство (6) приводится к виду

$$V = -G \int_0^{2\pi} \int_{r_a}^{r_b} \mu(R)\, R \frac{r\,dr\,d\varphi}{xr}\, dR. \tag{9}$$

При интегрировании x и R считаются постоянными; следовательно, потенциал шарового слоя толщиной dR с центром в O равен

$$V = -G\frac{R}{x}\mu(R) \int_0^{2\pi} \int_{r_a(\theta=0)}^{r_b(\theta=\pi)} dr\,d\varphi\,dR. \tag{10}$$

Выбор способа вычисления интеграла зависит от того, внутри или вне сферы радиуса R находится точка P. В нашем «астрономическом» случае точка P является внешней. Тогда

$$r_a = x - R,$$
$$r_b = x + R$$

и, следовательно,

$$V = -4\pi G\mu(R)\frac{R^2}{x}\,dR = -\delta m(R)\frac{G}{x}. \tag{11}$$

Сравнивая это выражение с (3), мы видим, что получилась такая формула, как если бы вся масса шарового слоя δm была сосредоточена в центре O. Это выражение справедливо для всех шаровых слоев данной сферы, если предположить, что плотность зависит только от расстоя-

ния от центра O (предположение не слишком грубое для Земли, по крайней мере в первом приближении).

Таким образом, в первом приближении мы можем рассматривать движение спутника Земли как движение точки с малой массой под влиянием притяжения другой точечной массы $M_\oplus$, расположенной в центре Земли.

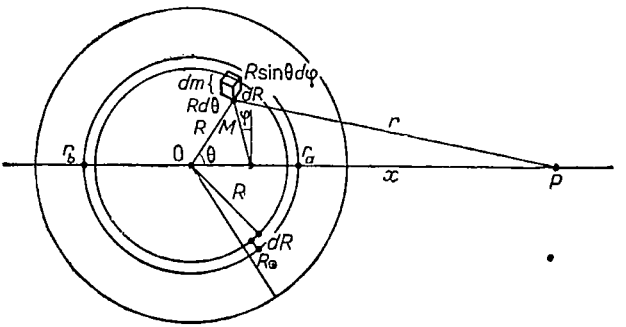


Рис. 3. Вычисление потенциала сферы на внешнюю точку.

К сожалению (или к счастью) для высокоточных астрономических наблюдений этого приближения недостаточно. Следовательно, мы вынуждены изучать *возмущения* такого движения. Это изучение даст нам ценную информацию о возмущающих силах; поэтому исследование динамики движения спутника представляет большой интерес. Позднее мы вернемся к этой проблеме (стр. 41).

Однако, перед тем как сформулировать задачи, с которыми на практике сталкиваются специалисты, изучающие движение спутников, полезно для оценки величин, с которыми приходится иметь дело, рассмотреть несколько простых задач.

3. Численное исследование простого случая круговой орбиты

Предыдущий анализ показывает, что в качестве первого приближения при исследовании движения спутников можно принять задачу о движении двух точечных масс. Круговые орбиты составляют семейство возможных

орбит, и с их помощью можно оценить порядки некоторых величин. Следует отметить при этом, что большинство реальных орбит почти круговые: так как радиус Земли ~ 7000 км, то у орбиты с высотой апогея

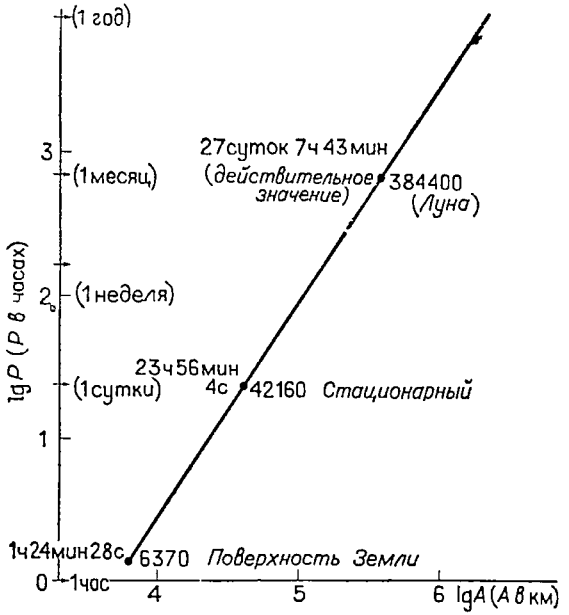


Рис. 4. Периоды обращения на околоземных круговых орбитах. По оси ординат — логарифм периода (в часах), по оси абсцисс — логарифм расстояния от центра Земли (в км).

700 км и перигея 350 км эксцентриситет очень мал: $e = 0{,}025$. Поэтому во многих практических случаях круговая орбита является достаточно хорошим приближением реальной орбиты.

Период P и большая полуось орбиты a (т. е. радиус круговой орбиты) связаны III законом Кеплера:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{GM_\oplus}{4\pi^2} = \text{const},$$

или

$$P = 2\pi (GM_\oplus)^{-1/2} a^{3/2}. \qquad (12)$$

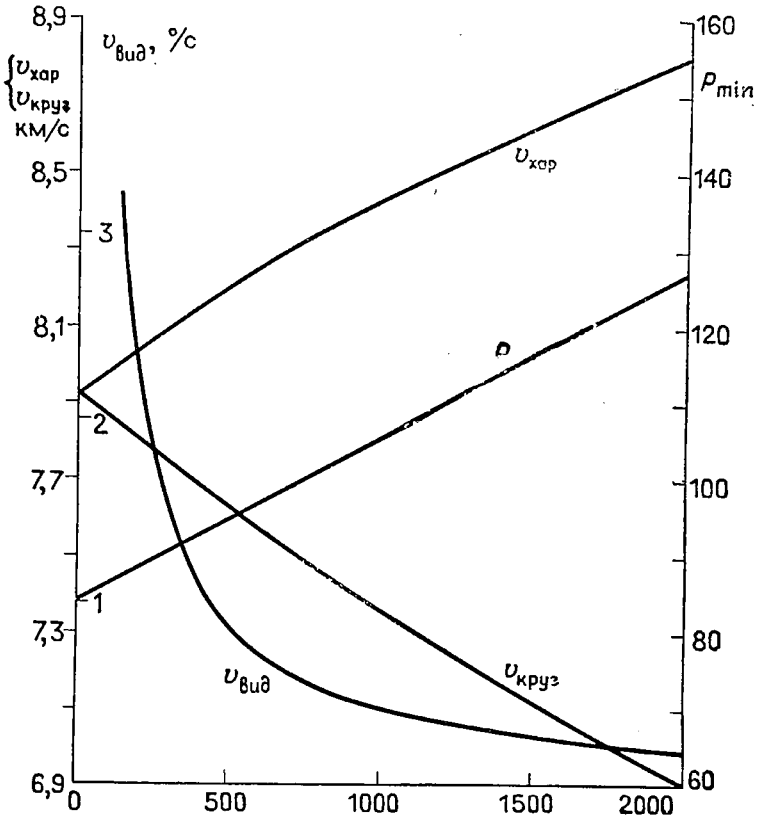


Рис. 5. Характеристики круговых орбит. По оси абсцисс — высота над поверхностью Земли (в км), по оси ординат — характеристическая и круговая скорости $v_{хар}$ и $v_{круг}$ (слева), видимая угловая скорость $v_{вид}$; на правой шкале — период P.

На круговой орбите величина скорости v (модуль вектора скорости) постоянна и равна

$$v_{круг} = (GM_{\oplus})^{1/2}\, a^{-1/2}. \qquad (13)$$

На рис. 4 и 5 приведены зависимости периода и скорости от расстояния. Заметим, что стационарному

спутнику (т. е. постоянно находящемуся над одной и той же точкой поверхности Земли; такой спутник запускается в плоскости экватора в сторону вращения Земли) соответствует расстояние от центра Земли до спутника:

$$a = 42\,160 \text{ км}.$$

Следует отметить, что если плоскость орбиты такого спутника немного наклонена к плоскости экватора, то с Земли будет казаться, что он совершает движение над одним и те же меридианом к северу и к югу от экватора. Добавим, что любое случайное отклонение орбиты от круговой приведет к тому, что скорость, согласно закону площадей (II закон Кеплера), будет изменяться вдоль траектории: такой спутник будет казаться двигающимся по кривой, похожей на восьмерку. Форма этой кривой очень чувствительна к возмущениям, изменяющим орбиту. Эволюции ее представляют большой интерес: наблюдая за ними можно, в частности, установить эллиптичность экватора Земли.

При $a = 384\,400$ км (среднее расстояние от Земли до Луны) период равен 27 сут 12 ч, что соответствует лунному месяцу, если принять массу Луны равной нулю; учитывая, что в действительности масса Луны $M_{\text{☾}}$ конечна, получим

$$P = 2\pi (M_{\oplus} + M_{\text{☾}})^{-1/2} a^{3/2} G^{-1/2} \qquad (14)$$

и легко найдем, что период равен 27 сут 7 ч 7 мин. Это очень близко к действительному значению 27 сут 7 ч 43 мин.

Мы уже говорили, что низкие спутники (к ним относятся все широко известные спутники) движутся по почти круговым орбитам. На рис. 5 приведены значения параметров строго круговых орбит низких спутников: периода, круговой скорости, максимальной видимой угловой скорости, — и величина $v_{\text{хар}}$, смысл которой будет выяснен ниже (стр. 69). Заметим, что видимая скорость спутника (например, в градусах в секунду времени) убывает значительно быстрее, чем круговая скорость.

4. Некруговые кеплеровские орбиты искусственных спутников

Не приступая пока к изучению возмущений, составляющих основную цель исследования движения спутников, обобщим полученные ранее результаты на случай некруговых орбит и найдем условия *выведения спутника на орбиту.*

В общем случае орбиты искусственных спутников не являются круговыми, хотя, как отмечалось выше, их

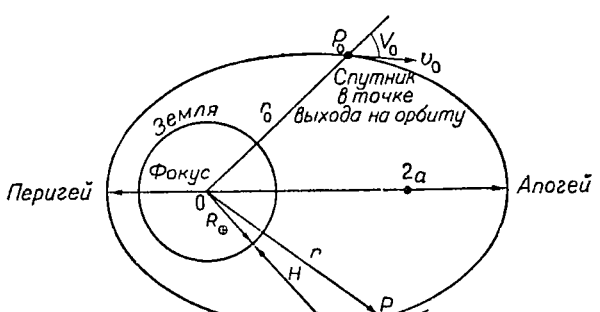


Рис. 6. Параметры, определяющие орбиту.

эксцентриситеты очень малы, так что они близки к круговым. Оставаясь в рамках кеплеровской задачи двух тел, предположим пока, что орбиты характеризуются лишь двумя параметрами: периодом и высотой перигея или высотами перигея и апогея. В одной из точек этой орбиты происходит выведение спутника по окончании полета ракеты-носителя. Величина и направление скорости в этой точке полностью определяют орбиту. Начальную скорость и положение точки выведения можно принять в качестве исходных параметров (рис. 6).

Напомним здесь ряд хорошо известных результатов теории кеплеровского движения.

Прежде всего, если точка выведения на орбиту лежит на поверхности Земли и если в этой точке скорость не направлена строго горизонтально или по величине меньше круговой, то орбита обязательно пересечет поверхность Земли в другой точке (вследствие симметрии

эллипса относительно большой оси), и дальнейший полет будет невозможен; следовательно, точка выведения должна располагаться над земной поверхностью. Мы увидим дальше, что спутник выводится в точку выхода на орбиту по промежуточной «переходной» орбите с использованием негравитационных сил.

Ясно, что при очень большой начальной скорости аппарат может выйти из гравитационного поля Земли и удалиться в «бесконечность» (т. е. в данном случае оказаться в поле тяготения Солнца). Напротив, если начальная скорость невелика, то аппарат вернется на Землю, поскольку «перицентр» * эллиптического движения лежит «ниже поверхности», т. е. внутри Земли.

Более того, отметим, что в этом случае (типичном для баллистики) можно вообще не пользоваться результатами астрономической задачи двух тел, а считать «поле тяготения» однородным в окрестности точки старта. При таком предположении траектория оказывается параболой. Точность этого приближения определяется точностью, с какой поверхность Земли можно считать плоскостью.

Когда скорость недостаточна ($V_0 = \pi/2$, $v_0 < v_{\text{круг}}$) или направлена негоризонтально ($V_0 < \pi/2$), мы имеем дело с задачей баллистики, рассматривающей, например, движение снарядов. Можно вычислить, на каком расстоянии ** от точки старта снаряд упадет на Землю. Вычисления проще провести, используя законы Кеплера. Из хорошо известного выражения (27), приведенного ниже, получаем

$$\varphi_0 = 2 \arccos \frac{1 - \alpha^2 \sin^2 V_0}{\sqrt{1 - (2 - \alpha^2)\alpha^2 \sin^2 V_0}}, \qquad (15)$$

где α определяется равенством

$$\alpha = v_0/v_{\text{круг}}. \qquad (16)$$

* В небесной механике термином «перигей» обозначают точку орбиты, ближайшую к центру Земли, а не к какой-либо точке ее поверхности. Поэтому более общий термин «перицентр» в данном случае эквивалентен термину «перигей». — *Прим. ред.*

** В данном случае имеется в виду угловое расстояние, т. е. угол между направлениями из центра Земли в точки старта и падения. — *Прим. перев.*

Максимальное расстояние достигается при

$$\sin^2 V_0 = \frac{1}{2-\alpha^2}, \tag{17}$$

и его значение равно

$$\varphi_{0,\max} = 2\arcsin\frac{\alpha^2}{2-\alpha^2}. \tag{18}$$

Вернемся к кеплеровским орбитам спутников. Тип орбиты характеризуется значением *постоянной энергии* h:

$$h = v_0^2 - 2G\frac{M_\oplus}{r_0}. \tag{19}$$

Если $h \geqslant 0$ (*гиперболические* или *параболические* орбиты), то орбита аппарата незамкнута. Направление скорости на бесконечности зависит от направления начальной скорости *, а величина ее зависит только от значения начальной скорости. Для параболической орбиты скорость на бесконечности равна нулю, для гиперболической эта скорость равна квадратному корню из постоянной энергии:

$$v_\infty = v_0\left(1 - 2G\frac{M_\oplus}{v_0^2 r_0}\right)^{1/2}. \tag{20}$$

При $h < 0$ орбита является *эллипсом*, который определяется величинами V_0, r_0, v_0 (вывод этих хорошо известных соотношений интересующийся читатель может найти в учебниках, где излагается теория конических сечений, или в курсах механики).

Большая полуось эллипса равна

$$a = -G\frac{M_\oplus}{h} = GM_\oplus\Big/\left(2\frac{GM_\oplus}{r_0} - v_0^2\right), \tag{21}$$

а период

$$P = 2\pi(GM_\oplus)^{-1/2}a^{3/2} = 2\pi GM_\oplus\left(\frac{2GM_\oplus}{r_0} - v_0^2\right)^{-3/2}. \tag{22}$$

Эксцентриситет e находится из соотношения

$$1 - e^2 = \frac{C^2}{GM_\oplus a}, \tag{23}$$

* А также ее численного значения. — *Прим. ред.*

где C — постоянная площадей, входящая во второй закон Кеплера:

$$C = \frac{r^2\, d\varphi}{dt} = \text{const} = r_0 v_0 \sin V_0. \tag{24}$$

Таким образом,

$$1 - e^2 = \frac{r_0^2 v_0^2 \sin^2 V_0}{(GM_\oplus)^2}\left(2\,\frac{GM_\oplus}{r_0} - v_0^2\right). \tag{25}$$

Концы большой оси находятся на следующих расстояниях от фокуса:

$$r_{\min} = a(1 - e), \quad r_{\max} = a(1 + e) \tag{26}$$

и называются соответственно *перигеем* и *апогеем* орбиты.

Теперь изучим движение спутника по эллиптической орбите. Положение спутника на орбите удобно описывать в полярных координатах r и φ (этот угол называется «истинной аномалией») *. Связь между этими координатами задается соотношением

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e\cos\varphi}. \tag{27}$$

Величины r и φ являются функциями времени, а величина скорости v находится из равенства:

$$v = (GM_\oplus)^{1/2}\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)^{1/2}. \tag{28}$$

Реальная эллиптическая орбита должна удовлетворять еще одному условию (первое условие $h < 0$):

$$r_{\min} = a(1 - e) > R_\oplus, \tag{29}$$

обеспечивающему движение спутника над поверхностью Земли.

Полагая заданным $r_0 = R_\oplus + H_0$, где H_0 — высота точки выведения спутника, и считая переменными только v_0 и V_0, мы получим двухпараметрическое семейство кривых, достаточно просто описывающих возможные орбиты.

Если $r_0 = R_\oplus$, то из первого условия, которому должна удовлетворять орбита, следует:

$$v_0 < \sqrt{2GM_\oplus/R_\oplus} = 11{,}2 \text{ км/с} = v_{p,0}$$

* Он отсчитывается от направления на перигей. — *Прим. перев.*

при любом V_0. Эллиптическая орбита существует тогда и только тогда, когда v_0 меньше «параболической» скорости $v_{p,0}$. В последующем мы используем несколько иные обозначения, в частности приняв новую единицу скорости.

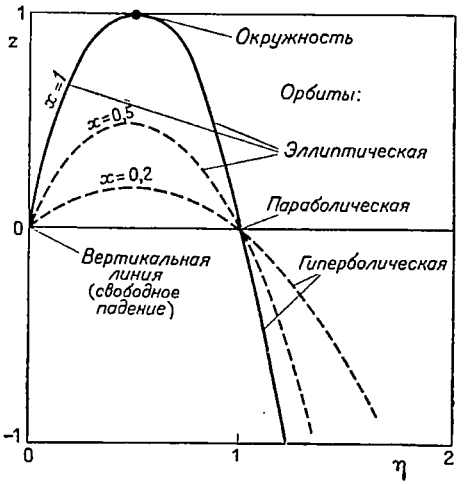


Рис. 7. С помощью функции $z(\eta)$ можно предсказать характеристики орбиты.

Введя безразмерные величины

$$y = (v_0/v_{p,0})^2, \quad \varepsilon = H_0/R_\oplus,$$
$$x = \sin^2 V_0$$

можно равенство (25) представить так:

$$z = 1 - e^2 = 4xy(1+\varepsilon)^2\left(\frac{1}{1+\varepsilon} - y\right) =$$
$$= 4xy(1+\varepsilon)[1-(1+\varepsilon)y]. \quad (30)$$

Отсюда сразу же вытекает, что эксцентриситет орбиты определяется двумя величинами: x (направление выведения) и произведением $(1+\varepsilon)y = \eta$.

Из этого соотношения следует, что для произвольной высоты H_0 параболическая скорость $v_{p,H}$ достигается при $\eta = 1$ и равна

$$v_{p,H} = v_{p,0}/\sqrt{1 + H_0/R_\oplus}. \quad (31)$$

График функции $z/x = 4\eta(1-\eta)$ изображен на рис. 7,

При $\eta = {}^1/_2\ z/x = 1$, так что скорость определяется равенством

$$v_0 = \left(\frac{GM_\oplus}{R_\oplus}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{H_0}{R_\oplus}\right)^{-1/2} = v_{\text{круг}}. \qquad (32)$$

На рис. 5 приведено значение этой величины при $H_0 = 0$.

Заметим, что при $x = 1$ (горизонтальное выведение) эта величина будет строго соответствовать круговой орбите. Когда v_0 переходит через это значение, тип орбиты меняется: при $v_0 > v_{\text{круг}}$ один из двух фокусов —

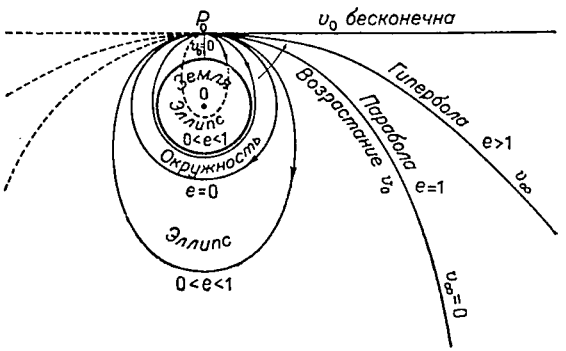


Рис. 8. Семейства орбит, соответствующие горизонтальному выведению.

центр Земли — оказывается ближайшим к точке выведения, которая оказывается перигеем орбиты; при $v_0 = v_{\text{круг}}$ оба фокуса орбиты совпадают в центре Земли; при $v_0 < v_{\text{круг}}$ центр Земли оказывается дальним фокусом, а точка выведения — апогеем орбиты (рис. 8).

Если $x < 1$ (наклонное выведение), то орбита никогда не будет круговой; при убывании v_0 большая ось эллиптической орбиты поворачивается и эксцентриситет проходит через минимальное значение, не достигая нуля (рис. 9).

Обратимся теперь ко второму условию, которому должна удовлетворять орбита:

$$r_{\min} = a(1 - e) > R_\oplus. \qquad (33)$$

При $x = 1$ можно написать (см. рис. 6)

$$2a > H_0 + 2R_\oplus. \tag{34}$$

Так как

$$\frac{a}{R_\oplus} = \frac{1}{2}\frac{1+\varepsilon}{1-\eta} \tag{35}$$

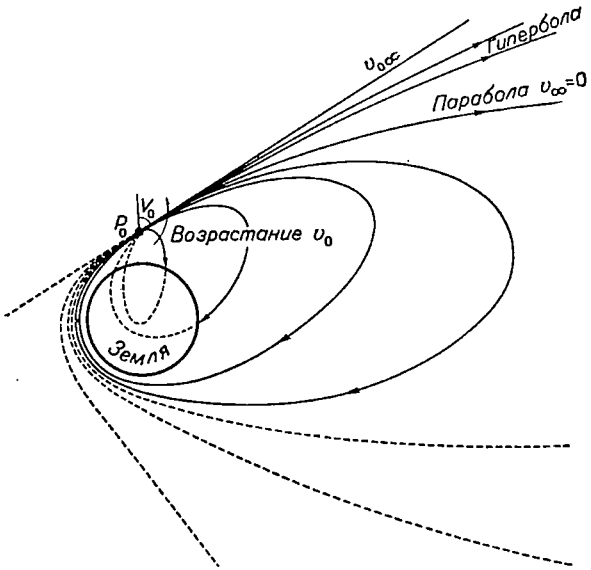


Рис. 9. Семейства орбит, соответствующие наклонному выведению. Круговая орбита невозможна.

[см. формулу (21) и определение параметров ε и η], то отсюда

$$\frac{1+\varepsilon}{1-\eta} > \varepsilon + 2, \tag{36}$$

или при малом ε

$$\eta > \frac{1}{2+\varepsilon} = \frac{1}{2} - \frac{1}{4}\varepsilon. \tag{37}$$

Следовательно, орбита пересечет Землю при значении v_0, меньшем следующей величины:

$$v_{\text{пад}} = (2GM_\oplus/R_\oplus)^{1/2}\left[\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4}\varepsilon\right)(1+\varepsilon)^{-1}\right]^{1/2}. \tag{38}$$

Можно было бы интуитивно почувствовать, что эта величина немного меньше круговой скорости.

При $x \neq 1$ вычисления несколько усложняются. Мы предоставим их проделать интересующемуся читателю. Приведенное выше условие перестает быть справедливым, если выведение происходит не в апогее. Нетрудно убедиться, что в любом случае вектор скорости в точке выведения должен лежать вне конической поверхности,

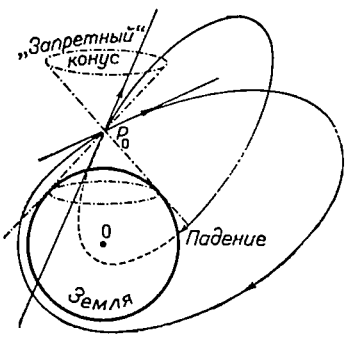


Рис. 10. Определение условий выведения на возможные орбиты.

касающейся земного шара, с вершиной в точке выведения (рис. 10).

Заметим, что во всех этих задачах угол между вектором скорости и вертикалью входит только под знаком квадрата синуса. Иными словами, орбиты с углами выведения V_0 и $\pi - V_0$ не отличаются друг от друга.

При отсутствии возмущений проблема орбитального движения спутника исчерпывается рассмотренными выше задачами. Специалисты по небесной механике быстро бы утратили к ним интерес, если бы не существовали высокоточные методы наблюдений, позволяющие изучать *возмущения* орбит, и если бы не возникла задача *орбитального перехода*, т. е. перехода с одной орбиты в поле тяготения на другую под действием добавочных сил, приложенных к спутнику в заданной точке.

5. Возмущения кеплеровских орбит

Среди возмущений наиболее важными являются те, которые вызываются несферичностью Земли.

А. Возмущения, вызываемые несферичностью Земли.

К центральной силе следует добавить притягивающую силу, направление которой изменяется. Упрощенно можно считать, что эта сила вызывается в основном экваториальным вздутием Земли. Ясно, что изучение возмущений движения искусственных спутников, вызываемых подобными силами, чрезвычайно важно для геодезии. Следует подчеркнуть, что возмущения движения искусственных спутников вследствие несферичности Земли ввиду небольших расстояний спутников от Земли имеют преобладающее влияние среди всех других гравитационных возмущений, о которых речь пойдет ниже.

Для расчета возмущенных орбит нам понадобится потенциал Земли, определенный равенством (4). Считая отношение R/x достаточно малым, представим равенство (7) в таком виде:

$$\frac{1}{r}=\frac{1}{x}\left(1+\frac{R}{x}f_1(\theta)+\frac{R^2}{x^2}f_2(\theta)+\ldots\right). \tag{39}$$

Функции $f_i(\theta)$ являются полиномами Лежандра от аргумента $\cos\theta$:

$$f_i(\theta)=P_i(\cos\theta), \tag{40}$$

где

$$P_i(x)=\frac{(2i)!}{2^i(i!)^2}\left[x^i-\frac{i(i-1)}{2(2i-1)}x^{i-2}+\ldots\right]. \tag{41}$$

Равенство (4) легко преобразуется в следующее соотношение

$$V=-G\int\frac{dm}{r}=$$

$$=-G\int\frac{dm}{x}\left[1+\frac{R}{x}f_1(\theta)+\frac{R^2}{x^2}f_2(\theta)+\ldots\right]=$$

$$=V_0+(V_1+V_2+\ldots)=V_0+\mathcal{R}. \tag{42}$$

Член нулевого порядка $V_0 = -GM/x$ был нами рассмотрен раньше.

Возвращаясь к рис. 3, найдем, что

$$\cos\theta = \frac{\alpha\xi + \beta\eta + \gamma\zeta}{Rx}, \tag{43}$$

где ξ, η, ζ — координаты точки M, в которой сосредоточена масса dm; α, β, γ — координаты точки P, в которой вычисляется гравитационный потенциал; наконец,

$$V_1 = -\frac{G}{x^3}\left[\alpha\int \xi\, dm + \beta\int \eta\, dm + \gamma\int \zeta\, dm\right]. \tag{44}$$

Интегралы, стоящие в скобках, определяют координаты центра масс тела (эти интегралы обращаются в нуль, если начало координат поместить в центре масс).

Таким же образом можно вычислить составляющие V_2, V_3, V_4. В выражение для V_2 входят главные и центробежные моменты инерции тела относительно осей координат. Члены V_3 и V_4 содержат моменты инерции высших порядков.

Если тело сферически симметрично и состоит из однородных шаровых слоев (случай, рассмотренный на стр. 28), то все члены, кроме V_0, обратятся в нуль.

В современных работах потенциал Земли представляется в виде функции от широты φ и долготы L:

$$V = -\frac{GM_\oplus}{r}\left\{1 - \sum_{n=2}^{\infty}\left[\mathcal{J}_n\left(\frac{R_\oplus}{r}\right)^n P_n(\sin\varphi) + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \sum_{m=1}^{n}\left(\frac{R_\oplus}{r}\right)^n p_n^m(\sin\varphi)\left(C_{nm}\cos mL + S_{nm}\sin mL\right)\right]\right\}, \tag{45}$$

где P_n — полиномы Лежандра, а p_n^m — присоединенные полиномы Лежандра:

$$p_n^m(x) = \sqrt{\frac{(n+m)!}{2(2n+1)(n-m)!}}(1-x)^{m/2}\frac{d^m P_n(x)}{dx^m}. \tag{46}$$

Коэффициенты $\mathcal{J}_n$ называются «зональными гармониками» *; они равны (Козаи, 1964 г.):

$$\mathcal{J}_2 = 1082{,}64 \cdot 10^{-6},$$

$$\mathcal{J}_3 = -2{,}55 \cdot 10^{-6},$$

$$\mathcal{J}_4 = -1{,}65 \cdot 10^{-6},$$

$$\mathcal{J}_5 = -0{,}21 \cdot 10^{-6}.$$

а коэффициенты C_{nm} и S_{nm} называются «тессеральными гармониками», согласно Андерлю (1965 г.):

$$C_{22} = 2{,}45 \cdot 10^{-6},$$

$$S_{22} = -1{,}52 \cdot 10^{-6}.$$

Физический смысл этих коэффициентов таков: $\mathcal{J}_2$ характеризует наличие экваториальной выпуклости Земли; $\mathcal{J}_3$ — асимметрию южного и северного полушарий (вследствие такой асимметрии Земля имеет грушевидную форму); C_{22} и S_{22} — эллиптичность экватора. Благодаря достигнутой высокой точности анализа наблюдений за движением спутников, к настоящему времени известны более 200 коэффициентов C_{nm} и S_{nm}.

Для вычисления и прогнозирования положения спутника с точностью до 20 м необходимо использовать все эти коэффициенты. Данные, полученные с помощью лазерной локации, позволят определить еще больше коэффициентов $\mathcal{J}_n$, C_{nm} и S_{nm}, и прогноз станет еще точнее.

Б. Другие гравитационные возмущения

Лунные возмущения в движении искусственных спутников Земли, как и приливные силы, более значительны, чем возмущения от Солнца. А если речь идет о космических аппаратах, предназначенных для полета к Луне, влияние Луны уже нельзя рассматривать как

---

* «Гармониками» обычно называют не постоянные величины $\mathcal{J}_n$, C_{nm}, S_{nm}, а функции в разложении (45), коэффициентами которых являются эти постоянные. — *Прим. ред.*

возмущающее — необходимо решать *задачу трех тел*, массой одного из которых можно пренебречь*.

Возмущения от Солнца также очень важны (они являются основными в движении естественных спутников — например, Луны — вокруг «своих» планет). В межпланетном полете (скажем, от Земли к другой планете) Солнце оказывается главным притягивающим телом, а Земля или, например, Марс становятся возмущающими телами при движении аппарата в гравитационном поле Солнца (см. стр. 72).

Возмущениями от других планет или искусственных спутников на околоземных орбитах можно пренебречь, за исключением случая очень близкого прохождения другого спутника. В этом случае происходит «столкновение», при котором спутники обмениваются энергиями и переходят с одной орбиты на другую; этот переход протекает за очень короткий промежуток времени по сравнению с периодом обращения, и длина отрезка перехода значительно меньше длины всей орбиты. Может случиться, что после «столкновения» новая орбита не будет принадлежать семейству допустимых орбит; тогда спутник неизбежно упадет на Землю. Однако число спутников, находящихся на околоземных орбитах, все еще слишком мало, и вероятность такого «столкновения» близка к нулю.

В. Негравитационные возмущения

Помимо возмущения из-за несферичности Земли, столь же значительную роль играет и ряд других возмущений.

Поскольку искусственные спутники движутся в достаточно плотной атмосфере, нельзя пренебрегать возникающей силой сопротивления. Эта сила зависит от высоты спутника и, следовательно, изменяется вдоль орбиты, если только орбита не является круговой.

Весьма существенно и влияние *давления солнечного излучения*, в особенности когда площадь поверхности спутника, освещаемая лучами Солнца, достаточно ве-

* Так называемая «ограниченная задача трех тел». — *Прим. перев.*

лика (как у спутников типа «Эхо»). Ясно, что действие солнечных лучей прекращается (или возобновляется) в тот момент, когда спутник с освещенной стороны переходит в область земной тени (или обратно). *Динамическими эффектами* от солнечного ветра, или потоков быстрых частиц, испускаемых солнечной короной, пренебрегать, разумеется, также нельзя, однако эти эффекты пока плохо изучены. Еще меньше исследованы *электростатические* и *электромагнитные* силы.

Г. Искусственные возмущения

Наконец, мы должны выделить представляющие особый интерес искусственные возмущения, которые вызываются радиокомандами, автоматическими программными устройствами на борту спутника или экипажем аппарата. Эти возмущения порождаются работой небольших реактивных двигателей, которые включаются для коррекции орбиты или траектории во время полета. Таким путем можно исправить ошибки выведения, а также получать траектории, не являющиеся ньютоновскими. Позднее мы подробней рассмотрим такие задачи, относящиеся к проблемам *астронавтики.* Однако, поскольку управление движением таких аппаратов может быть непрерывным, как, скажем, при движении автомобиля, исследование их динамики едва ли будет полезно для изучения естественных сил, действию которых они подвергаются. Это уже не экспериментальная небесная механика!.. Поэтому мы пока отложим знакомство с этими возмущениями, но позднее (стр. 65) вернемся к ним.

6. Подробное исследование гравитационных возмущений

Исследование гравитационных возмущений проводится обычно в рамках задачи трех тел (спутник, Земля, масса которой предполагается сосредоточенной в ее центре, и возмущающее тело). В общем случае эта задача исключительно сложна, поэтому мы коснемся здесь лишь некоторых ее сторон. Рассмотрим вначале простейший случай,

А. Определение нейтральной точки

Прежде всего рассмотрим простейший случай одномерной задачи (строгой!), в которой на прямой Земля — Луна разыскивается *нейтральная точка*, в которой притягивающие силы этих двух тел равны между собой. Затем мы исследуем некоторые свойства этой замечательной точки.

Обозначим через $M_\oplus$ и $M_\leftmoon$ массы Земли и Луны соответственно, сосредоточенные в точках O и O' (рис. 11). Тогда уравнение движения будет иметь вид

$$v\frac{dv}{dr} = -G\frac{M_\oplus}{r^2} \pm G\frac{M_\leftmoon}{(a \mp r)^2}. \tag{47}$$

Нижние знаки в этом уравнении соответствуют расположению тела на продолжении прямолинейного отрезка

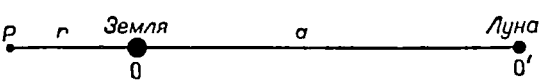


Рис. 11. К определению «нейтральной» точки.

Земля — Луна за его пределы. Верхние знаки соответствуют положению тела на этом отрезке между Землей и Луной.

Это уравнение легко интегрируется:

$$v^2 = v_0^2 + 2GM_\oplus\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right) \pm 2GM_\leftmoon\left[\frac{1}{a \mp r} - \frac{1}{a \mp r_0}\right]. \tag{48}$$

Для сравнения найденного результата с полученным ранее при рассмотрении системы спутник — Земля введем в это соотношение величины параболической скорости, соответствующие расстояниям r_0 (от центра Земли O) и b (от центра Луны O'); Землю и Луну мы здесь рассматриваем изолированно). Тогда можно написать (см. выше, стр. 35):

$$v_p^2(r_0) = 2G\frac{M_\oplus}{r_0} \tag{49}$$

и

$$v_p^2(b) = 2G\frac{M_\leftmoon}{b}, \tag{50}$$

следовательно,

$$v^2 = v_0^2 + v_p^2(r_0)\left(\frac{1}{r/r_0} - 1\right) \pm v_p^2(b)\left(\frac{1}{a/b \mp r/b} - \frac{1}{a/b \mp r_0/b}\right). \tag{51}$$

Положение нейтральной точки. Равенство сил притяжения Земли и Луны определяется соотношением

$$\frac{GM_\oplus}{r_н^2} = \frac{GM_☾}{(a - r_н)^2}, \tag{52}$$

откуда

$$r_н = \frac{a}{\sqrt{1 + \frac{M_\oplus}{M_☾}}}. \tag{53}$$

Подставляя сюда данные из табл. 6 приложения, найдем

$$r_н = 51{,}2R_\oplus. \tag{54}$$

Заметим, что $a = 60{,}258\,R_\oplus$.

Какова начальная скорость, необходимая для достижения Луны по прямой линии? Положив в (48) $r = r_н$ и $v = 0$, найдем, что минимальная начальная скорость, необходимая для перелета к Луне, равна

$$v_0 = 11{,}05 \text{ км/с}, \tag{55}$$

что немного меньше параболической скорости ($v = 11{,}18$ км/с). Ясно, однако, что без учета поступательного и вращательного движения Луны и Земли космический аппарат к Луне запускать нельзя, так что полученное приближение совершенно недостаточно.

Какова начальная скорость, необходимая для того, чтобы аппарат, запущенный с Земли, покинул поле тяготения Солнца? Заменим в предыдущих соотношениях Землю Солнцем и Луну Землей. Пользуясь данными о Солнце и Земле (приложение, табл. 5 и 6), получим величину 43,7 км/с. В действительности Земля обращается вокруг Солнца, так что спутник Земли уже имеет некоторую скорость относительно Солнца. Поэтому дополнительная скорость, необходимая для выхода из поля тяготения Солнца, меньше вычисленной выше. Позднее

мы подробно исследуем (стр. 72) движение аппарата вне области, где сила притяжения Земли является доминирующей.

Б. Вычисление гравитационных возмущений в общем случае

Очевидно, что вычисление гравитационных возмущений в общем случае — гораздо более сложная задача, чем в только что рассмотренном простейшем примере.

В принципе математическая формулировка этой задачи в самом общем виде дается уравнениями Лагранжа. Однако в случае искусственных спутников возмущения достаточно малы и поэтому их можно рассматривать независимо друг от друга. В этом случае уравнения движения имеют вид

$$\frac{d^2\mathrm{r}}{dt^2} = -G\left(\frac{M_\oplus + m}{r^3}\right)\mathrm{r} + GM'\left(\frac{\mathrm{d}}{d^3} - \frac{\mathrm{a}}{a^3}\right), \qquad (56)$$

где M' — масса возмущающего тела, расположенного на расстоянии a от центра Земли (рис. 12). Введя «возмущающую функцию» $\mathcal{R}$, напишем

$$\frac{d^2\mathrm{r}}{dt^2} = -G\left(\frac{M_\oplus + m}{r^3}\right)\mathrm{r} + \operatorname{grad}\mathcal{R}, \qquad (57)$$

где

$$\mathcal{R} = GM'\left(\frac{1}{d} - \frac{\mathrm{a}\cdot\mathrm{r}}{r^3}\right). \qquad (58)$$

Возмущающая функция $\mathcal{R}$ была уже раньше записана в общей форме без предположения о точечности массы M'. Однако в равенстве (42) $\mathcal{R}$ являлась функцией от широты и долготы точки на Земле, над которой находится спутник (подспутниковая точка); существенно, что возмущающие массы предполагались присоединенными к Земле.

Более удобно выбрать в качестве аргументов функции $\mathcal{R}$ шесть параметров оскулирующего кеплеровского эллипса * (большая полуось a, эксцентриситет e, накло-

* Оскулирующим эллипсом возмущенной траектории называется эллипс, по которому стало бы двигаться исследуемое тело, если бы начиная с данного момента все возмущения обратились в нуль. — *Прим. ред.*

нение i, долгота восходящего узла Ω, аргумент перигея ω, средняя аномалия M; см. рис. 16).

Уравнения Лагранжа позволяют найти изменения параметров оскулирующего эллипса. Решение этих уравнений возможно только приближенными методами. Мы не можем здесь углубляться в эти методы и отсылаем читателя к книге Ж. Ковалевски*. Для нас достаточно, что, пользуясь этой общей теорией и введя функцию

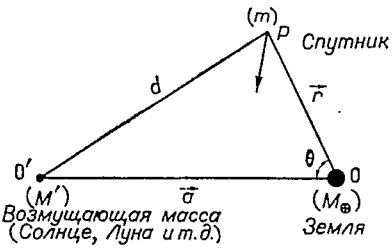


Рис. 12. К определению «нейтральной» точки.

$\mathcal{R}$, зависящую как от времени, так и от положения в пространстве, можно с ее помощью вычислить возмущения от Луны и Солнца.

B. Члены, зависящие от времени

В окончательном решении каждый параметр орбиты представляется рядом, содержащим четыре вида членов, зависящих от времени.

1. *Вековые члены.* Эти члены линейно зависят от времени. Они обнаруживаются в перемещении перигея (вращение «линии апсид», т. е. большой оси в плоскости орбиты) и восходящего узла (вращение плоскости орбиты вокруг земной оси). Эти два движения являются наиболее существенным свойством орбит искусственных спутников. Другие же изменения параметров суть просто колебания относительно некоторой средней величины, постоянной или линейно меняющейся со временем.

Поскольку вековые члены связаны с возмущающей функцией $\mathcal{R}$, определяемой гравитационным потенциалом сжатой Земли, для их расчета необходимо знать ее

* *J. Kovalevsky*, Introduction to celestial Mechanics, Springer,

потенциал. Приведенные выше выражения позволяют определить перемещение перигея и восходящего узла из соотношений (в градусах дуги за сутки)

$$\frac{d\omega}{\partial t} = 4{,}98\left(\frac{R_\oplus}{a}\right)^{7/2}(1-e^2)^{-2}(5\cos^2 i - 1), \qquad (59)$$

$$\frac{\partial\Omega}{\partial t} = 9{,}97\left(\frac{R_\oplus}{a}\right)^{7/2}(1-e^2)^{-2}\cos i, \qquad (60)$$

где правые части являются функциями от параметров орбиты (рис. 16). На практике эти члены имеют величины порядка нескольких градусов в сутки. Нетрудно убедиться, что два значения наклонения: $i = 90°$ и $i = 63°{,}4\,(\cos i = 1/\sqrt{5})$, играют особую роль. На полярной орбите ($i = 90°$) $\partial\Omega/\partial t = 0$; поэтому, когда значение i проходит через 90°, меняется направление вращения плоскости орбиты.

При $i \neq 63°{,}4$ («критическое» наклонение) имеет место либрация перигея: при $i < i_{\text{крит}}$ перигей движется в направлении вращения спутника, при $i > i_{\text{крит}}$ в противоположном *.

2. *Долгопериодические члены.* Эти члены сравнимы с членами, определяющими колебания Луны. Их период определяется движением перигея в плоскости орбиты спутника и равен двум — трем месяцам. Наиболее интересны долгопериодические члены, возникающие благодаря коэффициенту J_3 в разложении земного потенциала (характеризующему асимметричность северного и южного полушарий Земли). Наблюдаются большие изменения эксцентриситета. Высота перигея колеблется с амплитудой в несколько десятков километров.

3. *Члены с периодом, близким к суткам.* Они возникают вследствие зависимости потенциала от долготы и связаны с вращением Земли. Появление их объясняется, в частности, эллиптичностью экватора Земли.

---

* Здесь недостаточно точно описан характер движения перигея ИСЗ. Если наклонение i орбиты ИСЗ далеко от $i_{\text{крит}}$, то движение совершается так, как сказано у автора. Если же i близко к $i_{\text{крит}}$, то могут существовать либрационные орбиты спутников, т. е. такие орбиты, перигей которых не обладает вековым движением, а совершает только колебания около значения $\omega = \pi/2$ или $\omega = 3\pi/2$. — *Прим. ред.*

4. Наконец, существуют *члены, возникающие вследствие притяжения Солнца и Луны.* Для низких спутников они пренебрежимо малы и становятся значительными только на очень высоких орбитах (с большим эксцентриситетом) и, разумеется, на межпланетных траекториях.

7. Негравитационные возмущения

Силы негравитационного происхождения (сопротивление среды, давление солнечного излучения) играют значительную роль, однако практически невозможно построить аналитическую теорию возмущений от этих сил. При обработке наблюдений с целью оценки возмущающих факторов уравнения движения приходится решать специально подобранными численными методами.

Уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -G\left(\frac{M_\oplus + m}{r^3}\right)\mathbf{r} + F\left(\frac{d\mathbf{r}}{dt}, \mathbf{r}, t\right). \tag{61}$$

В частности, возмущающая сила сопротивления среды равна

$$F_{\text{тр}} = -kS\rho\left|\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right|^2, \tag{62}$$

где $|d\mathbf{r}/dt|$ — скорость спутника относительно атмосферы; ρ — плотность атмосферы, S — площадь поперечного сечения спутника; коэффициент k зависит от формы спутника, его величина — порядка единицы. Выражения для других возмущающих сил очень сложны, причем иногда они терпят разрыв, например при переходе из освещенной области в затененную.

Сила давления солнечного излучения на спутник равна

а) в случае полного отражения солнечных лучей

$$F_{\text{изл}} = \frac{2\Phi}{c} S; \tag{63}$$

б) в случае полного поглощения лучей («абсолютно черное тело»)

$$F_{\text{изл}} = \frac{\Phi}{c} S. \tag{64}$$

Если спутник имеет форму сферы радиуса σ_0, то $S = \pi\sigma_0^2$. Размерность величины Φ — потока солнечного излучения — эрг/см^2·с. Оценим теперь силу давления солнечного излучения. В общем случае она меньше силы притяжения Солнца, равной

$$F_{\text{сол}} = G\frac{M_\odot m}{D_\oplus^2}, \tag{65}$$

где $M_\odot$ — масса Солнца, $D_\oplus$ — расстояние от Солнца до Земли. Следовательно,

$$\frac{F_{\text{изл}}}{F_{\text{сол}}} = \frac{\Phi D_\oplus^2 S}{cGM_\odot m} \approx \frac{K}{\rho\sigma_0} \approx \frac{6\cdot 10^{-5}}{\rho\sigma_0}. \tag{66}$$

Для спутника, средняя плотность которого мала, это отношение велико; например, радиус и масса спутника «Эхо», представляющего собой полый металлический шар, равны соответственно 50 м и 40 кг, так что

$$\rho \approx 10^{-7}, \qquad \sigma_0 = 5\cdot 10^3, \tag{67}$$

откуда

$$F_{\text{изл}} = F_{\text{сол}}/10. \tag{68}$$

У французского спутника D1 $m \approx 50$ кг и диаметр около 50 см; следовательно,

$$\rho \approx 10^{-1}, \qquad F_{\text{изл}} = 10^{-5}F_{\text{сол}}. \tag{69}$$

Действие столь малой силы очень трудно обнаружить — даже в случае спутника типа «Эхо», — однако за много оборотов спутника по орбите возмущения накапливаются и становятся заметными, поэтому в расчетах необходимо эту силу учитывать.

Если возмущающие силы известны, то изменения параметров орбиты находятся интегрированием уравнений движения. При интегрировании по шагам на каждый момент времени вычисляется правая часть уравнения (61). Тем самым определяется вектор ускорения; затем, считая правую часть постоянной в пределах шага, мож-

но продолжить интегрирование еще на один шаг. Точность этого метода в основном зависит от величины шага, т. е. от интервала времени между моментами, для которых вычисляется правая часть. Очевидно, этот интервал должен быть гораздо меньше периода обращения спутника.

Конечно, тот факт, что мы не знаем точного выражения для возмущающих сил, создает определенные

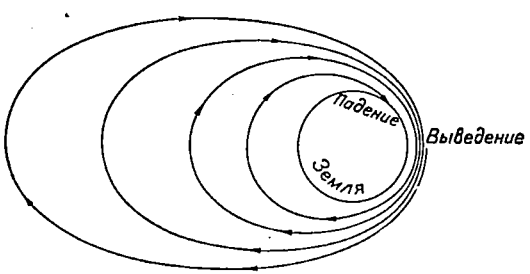


Рис. 13. Влияние торможения в атмосфере (схема).

трудности: нам приходится считать эти силы известными лишь приближенно. Однако сравнение теоретических расчетов с наблюдениями дает возможность оценить методом последовательных приближений величину возмущающего члена любой природы.

Рассмотрим для примера, как решается задача об эволюции эллиптической орбиты под действием сил сопротивления среды. Заметим прежде всего, что эти силы, направленные против движения, уменьшают энергию спутника (она переходит к молекулам атмосферы). Предполагая, что эти силы на спутник действуют только в перигее (поскольку плотность атмосферы быстро убывает с высотой), можно считать, что потенциальная энергия спутника при каждом прохождении перигея остается постоянной и, следовательно, атмосфере передается лишь кинетическая энергия. В результате спутник как бы переходит с одной кеплеровской орбиты на другую с уменьшающейся от витка к витку скоростью в точке выведения на орбиту (рис. 13). Кинетическая

энергия спутника в перигее, согласно (28), равна *

$$E = GM_{\oplus}m\left(\frac{1}{r_{\text{пер}}} - \frac{1}{r_{\text{пер}} + r_{\text{ап}}}\right) = GM_{\oplus}\frac{mr_{\text{ап}}}{r_{\text{пер}}(r_{\text{пер}} + r_{\text{ап}})}. \quad (70)$$

С каждым оборотом апогей приближается к Земле и энергия E убывает. Потеря энергии за один оборот равна

$$\Delta E = \Delta r_{\text{ап}} m \frac{GM_{\oplus}}{r_{\text{пер}}^2}. \quad (71)$$

С точностью до величин второго порядка можно считать

$$r_{\text{пер}} \approx r_{\text{ап}} \approx R_{\oplus}.$$

С другой стороны, энергия, потерянная под действием сил сопротивления и перешедшая в окружающую среду в течение одного оборота, определяется интегралом, вычисленным вдоль орбиты

$$\Delta E_{\text{тр}} = kS \int \rho v^2 ds. \quad (72)$$

Эти два выражения должны быть равны, что позволяет определить изменение высоты апогея $\Delta r_{\text{ап}}$. Рассмотрим количественный пример. Положим, что первоначально апогей находится на высоте 600 км, а перигей — на высоте 200 км; массу спутника примем равной 50 кг, его радиус 50 см. Выясним, насколько опускается апогей за один оборот. Усредняя подинтегральное выражение в (72), получим

$$\int \rho v^2 ds \approx \bar{\rho}\overline{v^2} \int ds,$$

принимая затем $\bar{\rho} = 10^{-14}$ и $\overline{v^2} = v_{\text{пер}}^2$, найдем:

$$\Delta r_{\text{ап}} = \frac{kS}{m} f = 80 \text{ м}, \quad (73)$$

где $k = 1$ и f — коэффициент, зависящий от параметров орбиты. Оценим время существования спутника, т. е.

* Величина скорости v, согласно (28), соответствующая $r = r_{\text{пер}}$, подставляется в выражение для кинетической энергии $E = \frac{1}{2} mv^2$ и учитывается, что $a = \frac{1}{2}(r_{\text{пер}} + r_{\text{ап}})$. — *Прим. перев.*

время, за которое апогей опустится на 400 км, так как на получившейся круговой орбите потери энергии из-за сил сопротивления среды, действующих уже в каждой точке орбиты, резко возрастут и можно считать, что спутник быстро прекратит свое существование. Нетрудно вычислить, что это время соответствует 5000 оборотам, т. е. равно примерно 3 годам. Понижение апогея спутника D1 (высота перигея 500 км) составляет 50 см за оборот.

Наблюдения позволяют нам уточнять исходные сведения о плотности атмосферы. Кроме того, используя физические представления, можно оценить различные возмущения, действующие на спутник. Таким образом, можно исследовать, например, связь между явлениями, происходящими на Солнце, и движением спутника. Позднее мы к этому вернемся. Теперь же познакомимся с некоторыми астрометрическими методами, применяемыми при наблюдениях за спутниками.

8. Наблюдение спутников и анализ измерений

Из предыдущего становится ясным, что, наблюдая за эволюцией орбит искусственных небесных тел, можно обнаружить действующие на них возмущения. Изучение этих возмущений является важнейшей целью наблюдений за спутниками. Мы опишем несколько методов наблюдений и укажем, в каких пределах они оказываются полезными. Эти методы были развиты на базе методов классической астрономии.

А. Определение угловых координат

Прежде всего необходимо сделать замечание о точности определения положения спутника и отсчета соответствующего момента времени.

Видимая скорость низких спутников составляет $\sim 40'$ в 1 с (рис. 5). Следовательно, средняя ошибка отсчета момента времени 10^{-3} с соответствует ошибке в положении $0{,}04'$. Таким образом, при определении положения таких спутников бесполезно надеяться получить точность выше $1''$. С другой стороны, при большом удалении объекта от Земли (станции «Луна», «Пионер»

и т. д.) максимальная точность отсчета моментов времени зависит от точности определения положения. На рис. 14 приведены предельные точности измерений угловых положений и моментов времени (по данным Доманже).

Эти предельные значения почти недостижимы из-за ошибок астрономического происхождения (рефракция, мерцание) и инструментальных ошибок (дифракция).

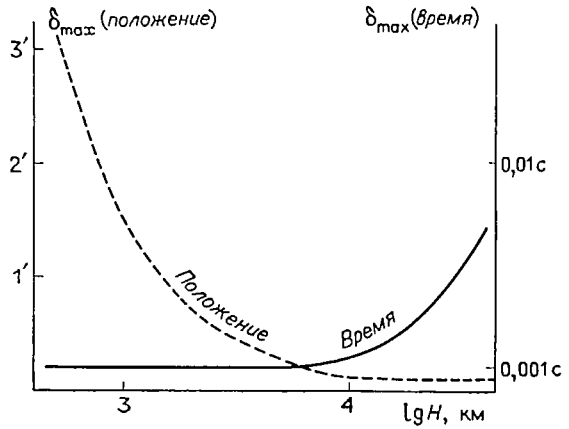


Рис. 14. Максимальная точность измерений положения и времени (по Доманже). По оси абсцисс — логарифм высоты (в км) спутника над Землей.

Только на внеземных обсерваториях можно получить более высокие точности, но таких обсерваторий пока нет. В настоящее время применяются классические методы наблюдений и астрономические приборы (как для визуальных, так и для фотографических измерений), очень похожие на те, которые используются для обнаружения комет и астероидов. Основное различие возникает вследствие того, что экваториальные установки подходят для решения конкретных задач не лучше, чем азимутальные. Действительно, видимое движение искусственных небесных объектов (за исключением, может быть, очень далеких) почти не зависит от суточного вращения небесной сферы.

1. Визуальные наблюдения. В ходе таких наблюдений определяется положение объекта относительно звезд. Для этой цели можно построить специальные теодолиты со считывающим устройством, позволяющим быстро регистрировать нужное направление. Объект захватывается в поле зрения прибора, помещается на перекрестии нитей сетки и затем прослеживается. Когда прибор будет наведен достаточно хорошо, он фиксируется, записывается время (точный момент прохождения перекрестия нитей) и считываются координаты объекта. За одно прохождение спутника можно провести 50—100 измерений — по несколько в минуту. Конечно, персонал должен быть хорошо обучен, а прибор оснащен автоматическим устройством, позволяющим считывать показания, например самописцем. В таких наблюдениях нетрудно достичь точности 0,1° и 0,1 с. С помощью обычных легких приборов можно наблюдать объекты 8-й — 9-й звездной величины.

2. Фотографические наблюдения. Безусловно, при фотографировании достигается более высокая точность. Обычно у фотографического объектива настолько большое действующее отверстие, что диаметр дифракционного кольца оказывается меньше размеров зерна фотоэмульсии. Таким образом, максимальная точность фотографического определения положения ограничивается величиной зерна фотопластинки. На превосходных камерах Бейкер-Нанн, имеющих объектив с апертурой 50 см, диаметром 78 см и фокусным расстоянием 50 см, можно добиться точности 2″ по угловому положению. Применяются два метода наблюдений. В первом случае прибор устанавливают так же, как и при наблюдениях звездного неба. След спутника на фотографии имеет вид линии на фоне звезд. Эта линия прерывается при закрытии затвора фотоаппарата, который приводится в действие через строго определенные промежутки времени. Измеряя длины отрезков получившейся прерывистой линии, можно определить траекторию спутника. Выдержка при фотографировании устанавливается в зависимости от скорости и яркости спутника. Можно фотографировать высокие спутники

с яркостью не выше 10-й звездной величины, а низкие (из-за высокой скорости перемещения) — с яркостью лишь до 6-й величины. Однако это ограничение компенсируется близостью спутника к Земле, поскольку (при прочих равных условиях) они выглядят ярче, чем более удаленные спутники.

Это ограничение пока сохраняется. Его можно преодолеть, применяя другой метод, в котором изображение спутника фиксируется на фотографиях. При этом камера поворачивается, следя за движением спутника. Но звезды представляются движущимися, и, следовательно, их кажущаяся яркость на фотографии уменьшается, в то время как яркость спутника возрастает. В определенные моменты затвор закрывается и линии, соответствующие кажущемуся движению звезд, прерываются; затем проводятся измерения получившихся на снимке отрезков.

3. Интерферометрические измерения. Оптические методы определения траектории спутника не являются единственными: кроме них, можно применять и радиоастрономические методы. Если спутник излучает радиосигналы, то его положение можно определить интерферометрическим методом. Пока этот метод уступает по точности методу фотографического определения положения, однако он позволяет следить за спутниками, малая яркость которых делает бесполезными оптические методы. Кроме того, при некоторых условиях, когда оптическое наблюдение невозможно (например, при заходе спутника в тень Земли или при мощной облачности), эти методы все же позволяют следить за спутником.

Б. Определение лучевой скорости

Положение и скорость спутника являются функциями времени. Теоретически можно определить полностью орбиту по измерениям скорости. Такие измерения осуществимы, если на спутнике установлен узкополосный передатчик со стабильной частотой сигналов, или отражатель, возвращающий на Землю часть радиоволн, посланных наземными передатчиками (ими могут быть и

лазеры). Известно, что изменение частоты сигнала, принятого на Земле, связано в первом приближении с лучевой (вдоль луча зрения) скоростью v_R спутника и частотой f посланного со спутника сигнала посредством соотношения

$$df = f\frac{v_R}{c}. \tag{74}$$

Частота сигнала, посланного с Земли и отраженного спутником, изменится на величину

$$df' = 2f'\frac{v_R}{c}. \tag{75}$$

На практике непосредственно измеряется не скорость, а изменение расстояния за достаточно короткий промежуток времени.

Точность этих методов очень высока; они уже применяются в морской навигации (система «Транзит»). Ошибка в определении местоположения не превышает 20 м.

В. Определение расстояния

Используя созданные в последнее время лазерные методы измерений, можно добиться точности 1—2 м. Многообещающие методы лазерной локации позволят получить значительно более высокую точность, чем другие методы.

В некоторых системах (например, в системе «Секор») расстояние (и лучевая скорость) измеряется с помощью установленных на спутнике «ответчиков».

Г. Анализ измерений. Результаты

Обработка данных измерений не представляет особой трудности. Оптические наблюдения обрабатываются традиционными методами, требующими, в частности, введения поправок за рефракцию. В радиоизмерениях необходимо вносить также поправку за ионосферную рефракцию. Измерения целесообразно проводить на двух частотах, поскольку при этом расчеты упрощаются. Для определения орбит необходимо проводить измерения с нескольких наземных станций. В этом случае вычисление

параметров орбиты сводится к чисто геометрическим и тригонометрическим определениям.

По результатам измерений исследуются возмущения кеплеровской орбиты. Следует отметить, что вращение Земли вносит дополнительную трудность, поскольку, с одной стороны, кеплеровская орбита лежит в плоскости, неподвижной в фиксированной системе координат,

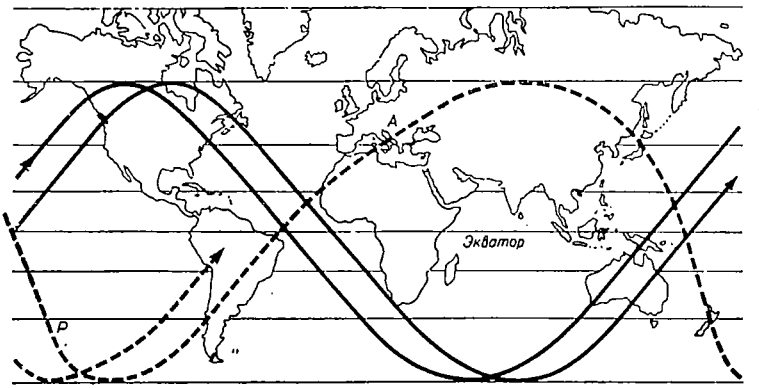


Рис. 15. Прецессия орбиты. Узел движется по экватору к западу. Обратите внимание, как искривляется проекция орбиты вследствие ее эллиптичности, согласно закону площадей. Сплошной линией обозначена круговая орбита, прерывистой — эллиптическая.

связанной с далекими объектами — звездами и галактиками, а с другой, эта плоскость перемещается в географической системе координат из-за прецессии орбиты. Наиболее сложно учитывать прецессию эллиптической орбиты, поскольку из-за неравномерности движения спутника проекция траектории на поверхность земного шара имеет неправильный характер в отличие от проекции круговой орбиты.

Что мы получим, преодолев эти трудности, исследовав наблюдения и перейдя к неподвижной системе координат? Другими словами, как мы можем описать орбиту? На рис. 16 изображены элементы орбиты: перигей, аргумент перигея, апогей, наклонение плоскости орбиты к плоскости экватора Земли и, наконец, прямое восхождение восходящего узла, отсчитываемое от на-

правления в точку весеннего равноденствия ♈. Эти элементы сохраняют постоянное значение на идеальных кеплеровских орбитах. Но под влиянием возмущений они изменяются, благодаря чему возможно изучение самих возмущающих сил.

Из рис. 17 (данные относятся к 2-му советскому спутнику) ясно видно, как влияет сопротивление атмосферы. В частности, заметно быстрое понижение апогея, о чем уже говорилось выше (стр. 54).

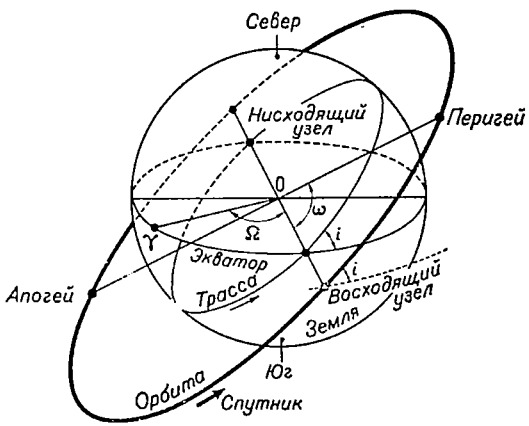


Рис. 16. Параметры орбиты.

Подобные эффекты приводят к весьма важным результатам.

Прежде всего можно определить *плотность атмосферы* на больших высотах. На рис. 18 представлены данные, полученные из наблюдений за искусственными спутниками. (В книге Les observatoires spatiaux эти вопросы обсуждаются подробней.) Поразительно, что плотность атмосферы зависит от активности Солнца, как можно видеть на рис. 19, где представлены замечательные результаты, полученные Барлье и Шассэном. На этом же рисунке изображен график скорости изменения периода в зависимости от времени. Видно, что 26 и 31 мая 1966 г. геомагнитный индекс (параметр, характеризующий солнечную активность) сильно коррелирует

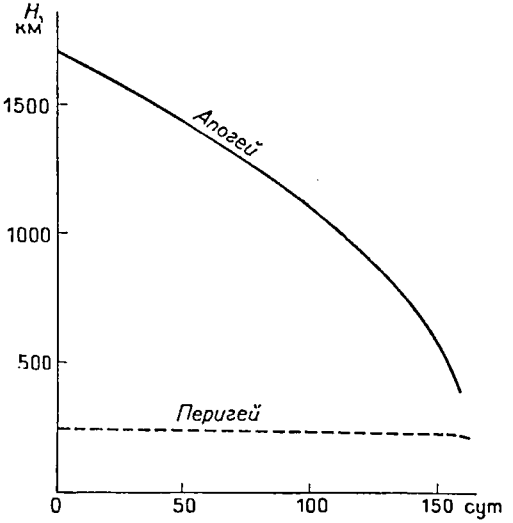


Рис. 17. Влияние торможения на орбиту второго советского спутника (см. также рис. 13).

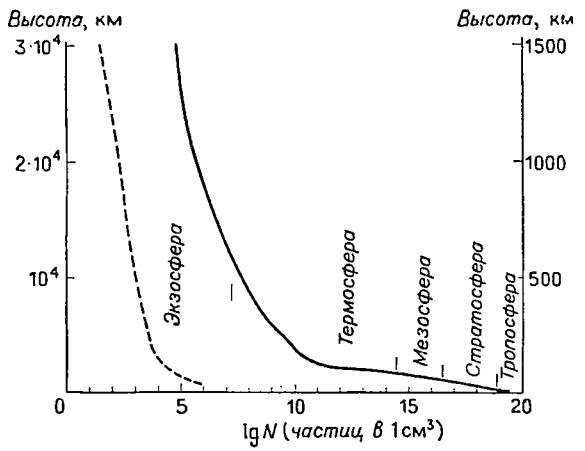


Рис. 18. Плотность атмосферы Земли, определенная путем изучения движения спутников. Левая шкала соответствует прерывистой линии, правая — сплошной; ось абсцисс — общая.

со скоростью изменения периода. Подобные примеры многочисленны.

Возмущающее влияние давления солнечного излучения в отличие от влияния трения в атмосфере, носит периодический характер. Его исследование позволило,

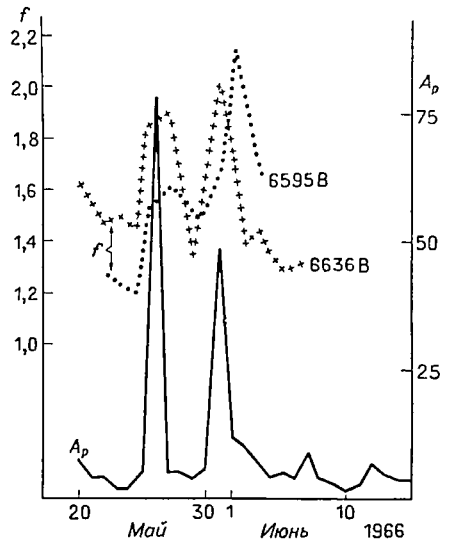


Рис. 19. Корреляция между движением спутников и геомагнитной солнечной активностью (по Барлье и Шассэну). A_p — геомагнитный индекс. На примере двух спутников видно, что величина f (отношение истинной плотности к той, которая дается моделью атмосферы) тесно коррелирует с изменением индекса.

например, установить утечку газа в спутнике «Эхо-1» (вследствие ударов метеоритов) и соответствующее уменьшение массы. Кроме того, были получены сведения о плотности атмосферы на высотах от 900 до 1500 км.

Задачи, связанные с гравитационными возмущениями от Солнца, Луны и несферичности Земли, носят другой характер, так как их теоретическое решение может быть получено с высокой точностью a priori на основе современных методов, развитых в этой области. Поэтому

с помощью спутников можно определять различные константы (например, массу и размеры Земли) гораздо точнее, чем самыми точными из имевшихся ранее методами астрономии и геофизики. Разумеется, подобные исследования не очень наглядны. Однако они имеют фундаментальное значение. Уточнение параметров геоида, в частности грушевидной фигуры Земли, в полной мере демонстрирует чудеса точности наблюдений и вычислений.

ГЛАВА III

ВВЕДЕНИЕ В АСТРОНАВТИКУ

1. Переходные орбиты

Из проделанного выше исследования кеплеровских орбит следует, что практически невозможно вывести спутник на орбиту непосредственно с Земли. Единственная возможность заключается в горизонтальном запуске спутника, однако рельеф местности и атмосфера создают для этого непреодолимые трудности, так что подобный запуск мыслим лишь теоретически.

Следовательно, спутник можно вывести на орбиту вокруг Земли только на ненулевой высоте, на которую он должен быть доставлен специальной ракетой-носителем. Изучение траекторий ракет-носителей является одной из основных задач, связанных с выведением любого спутника на кеплеровскую орбиту. Эта задача составляет содержание так называемой проблемы *переходных орбит*.

В проблему переходных орбит, относящуюся к небесной механике, вводятся дополнительные ограничения, связанные с экономической стороной запуска (например, время перехода или затраченная на вывод энергия должны быть минимальными). Необходимо учесть также, что при управлении на участке выведения возможны случайные ошибки, возрастание которых приводит к увеличению стартового веса аппарата за счет топлива, необходимого для коррекции траектории. Недостаточно предоставить объекты действию только гравитационных сил (один из моих коллег говорил: «уснуть на руках Ньютона»). Так же, как и на Земле, в космосе необходима *навигация* и *управление*. И здесь небесная механика уже бесполезна, за исключением расчета участка траектории, где в целях экономии топлива аппарат движется с выключенными двигателями. Так

экономный шофер выключает зажигание и ведет автомобиль по проселочной дороге вниз только под действием силы тяжести, несмотря на все преимущества шоссе.

Общий расход энергии в конце подъема пропорционален v_0^2 и, конечно, массе (спутника, ракеты-носителя и двигателей), но не зависит от угла выведения V_0. Очевидно, эллипс является самой экономичной траекторией при перелете из одной точки в другую (рис. 20).

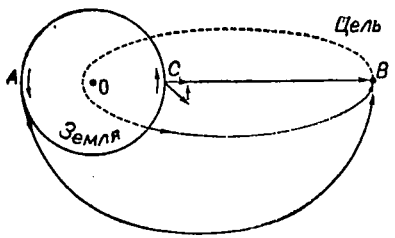


Рис. 20. Некоторые возможные траектории между Землей и целью.

Если аппарату сообщена параболическая (или бо́льшая) скорость, он удалится в бесконечность. Однако, если такая скорость используется для перехода на конечное расстояние, то в конце перелета аппарата сохранится бесполезная остаточная энергия.

Время перелета от перицентра к апоцентру (полупериод) по III закону Кеплера равно

$$t_1 = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{2^{3/2}} \frac{(r_{\min} + r_{\max})^{3/2}}{GM_\oplus}. \qquad (1)$$

Однако, в общем случае, аппарат может запускаться из произвольной точки земной поверхности. При вертикальном запуске достигается наименьшее время перехода (предполагается, что в конечной точке B скорость равна нулю):

$$t_2 = \frac{1}{(2GM_\oplus)^{1/2}} \int_{r_{\text{круг}}}^{r_{\max}} \frac{dr}{\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{\max}}\right)^{1/2}}, \qquad (2)$$

или

$$t_2 = \frac{(r_{max})^{3/2}}{2(2GM_{\oplus})^{1/2}}[\pi - \theta_0 + \sin\theta_0], \quad (3)$$

где

$$r_{круг} = r_{max}\sin^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right), \quad (4)$$

откуда определяется угол θ_0.

Простые вычисления показывают, что при полете к Луне

$$t_1 \approx 120 \text{ ч},$$

$$t_2 \approx 116 \text{ ч}.$$

Каждому из этих случаев соответствует своя начальная скорость, незначительно отличающаяся от параболической скорости, поскольку расстояние до Луны достаточно велико:

при вертикальном запуске

$$v_0 = 11{,}1 \text{ км/с};$$

при горизонтальном —

$$v_0 = (11{,}1 + 1{,}5) \text{ км/с}.$$

При этом необходимо учесть вращение Земли, скорость которого в точке запуска (0,46 км/с на экваторе) следует добавить (векторно) к скорости аппарата. При вертикальном запуске начальная скорость должна быть направлена наклонно и немного увеличена (рис. 20, точка C).

При горизонтальном старте скорость можно уменьшить на 0,46 км/с. Однако это относится лишь к тому случаю, если Луна в момент ее достижения окажется в плоскости экватора Земли.

Таким образом, горизонтальный запуск теоретически предпочтителен. Но на практике поступают иначе, поскольку приходится учитывать сопротивление плотных слоев атмосферы Земли. При горизонтальном запуске сопротивление атмосферы (из-за которого приходится

увеличивать начальную энергию, так как часть энергии тратится на преодоление сопротивления) действует на большем участке траектории, поэтому в этом случае потери энергии более значительны.

Разумеется, время перехода не является единственным интересующим нас параметром. Оно играет основную роль только в задаче перехода из одной фиксированной точки в другую. В большинстве же случаев задача состоит не только в том, чтобы доставить спутник на определенную высоту, но и сообщить ему надлежащую скорость с таким расчетом, чтобы он вышел на желаемую орбиту с минимальным расходом топлива. Если движение по орбите происходит в направлении вращения Земли, а запуск произведен горизонтально, то достигается двойное преимущество, поскольку при старте и выводе на орбиту используется скорость вращения Земли, и тангенциальная составляющая скорости будет максимальной. По закону площадей

$$v_{r,\max} = \frac{r_{\min}}{r_{\max}} v_0. \tag{5}$$

На орбите Луны (ее орбитальная скорость относительно Земли равна 2,39 км/с) скорость $v_{r,\max}$ равна 0,19 км/с, так что относительная скорость в момент достижения Луны оказывается слишком большой, и при мягкой посадке на Луну для предотвращения быстрого падения и разрушения аппарата необходимо включать тормозные двигательные установки. Величина относительной скорости будет почти такой же при вертикальном старте или при горизонтальном старте в направлении, противоположном вращению Земли. Однако это справедливо лишь для очень высоких орбит. На низких орбитах действуют другие закономерности.

При выходе на круговую орбиту с высотой H посредством перехода типа перигей — апогей следует использовать соотношение

$$v_{r,\max} = \left(\frac{R_\oplus}{R_\oplus + H}\right) v_0, \tag{6}$$

но при этом скорость должна быть не меньше круговой (едва ли представит интерес вывести спутник, сразу

обреченный упасть обратно на Землю — вот почему мы говорим: «не меньше»). Таким образом,

$$v_{r,\,\text{круг}} = \frac{2\pi(R_\oplus + H)}{P} =$$

$$= (R_\oplus + H)^{-1/2}(GM_\oplus)^{1/2} \sim -\frac{1}{R_\oplus}\left(1 - \frac{H}{2R_\oplus}\right)\sqrt{GM_\oplus}. \quad (7)$$

Для заданной высоты H скорость v_0 определяется из равенства

$$v_0^2 = \frac{2GM_\oplus}{R_\oplus} - \frac{GM_\oplus}{R_\oplus + H}, \quad (8)$$

т. е.

$$v_0^2 \approx \frac{GM_\oplus}{R_\oplus}\left(1 + \frac{H}{R_\oplus}\right), \quad (9)$$

или

$$v_0 = v_{\text{круг},\,0}\left(1 + \frac{H}{R_\oplus}\right)^{1/2}. \quad (10)$$

Эта скорость называется *скоростью гомановского перехода.*

Таким образом, скорость, необходимая для орбитального перехода (характеристическая скорость), должна быть не меньше определенной величины:

$$v_{\text{хар}} = v_0 \approx v_{\text{круг},\,0}\left(1 + \frac{H}{2R_\oplus}\right). \quad (11)$$

На рис. 5 (стр. 31) показана зависимость этой скорости от высоты. Переходные траектории такого типа были впервые изучены Гоманом и получили название «гомановских полуэллипсов». Фактически при учете членов второго порядка скорость $v_{r,\,\max}$, в апогее не равна $v_{\text{круг},\,H}$. Поэтому более точно:

$$\frac{v_{r,\,\max}}{v_{r,\,\text{круг}}} = \frac{R_\oplus}{R_\oplus + H}\,\frac{v_{\text{хар}}}{v_{\text{круг},\,0}}\sqrt{\frac{R_\oplus + H}{R_\oplus}} \approx 1 - \frac{H}{R_\oplus}. \quad (12)$$

Следовательно, в момент выхода на орбиту спутнику должна быть сообщена дополнительная скорость $(H/R_\oplus)\,v_0$. При $H/R_\oplus = 0{,}1$ величина этой добавочной скорости не превышает 1 км/с.

Таким образом, гомановские полуэллипсы — самые экономичные траектории, но из-за сопротивления атмосферы они оказываются совершенно бесполезными.

Мы могли бы рассмотреть орбиту, более экономичную в принципе: близкую к гомановской, но не касательную к основной орбите, на которую выводится спутник. Эта орбита имела бы более высокий апогей, чем основная орбита. Для этого было бы достаточно увеличить v_0 на небольшую величину порядка $v_0 H/R_\oplus$. Однако эту возможность можно исключить из рассмотрения. Действительно, в момент перехода на орбиту следовало бы изменить направление скорости, уменьшив ее радиальную составляющую таким образом, чтобы спутник оказался на круговой орбите. Простые расчеты показывают, что в итоге теряется больше, чем приобретается!

Существуют ли другие орбиты, касательные к основной орбите, но соответствующие негоризонтальному направлению скорости запуска? Легко показать, что в этом случае скорость была бы немного меньше, чем в случае гомановской орбиты, и, следовательно, для перевода спутника на круговую орбиту необходимо было бы соответственно немного увеличить скорость в апогее. Совершенно ясно, что апогей у таких орбит такой же, как и у гомановских, но перигей ближе к центру Земли.

Однако, как уже отмечалось, гомановские орбиты имеют серьезный недостаток, связанный с наличием сопротивления атмосферы. Поэтому более целесообразно рассматривать орбиты других типов.

Прежде всего — вертикальный запуск, при котором легче всего преодолеть трудности, связанные с атмосферным сопротивлением, но при этом усложняется вывод на орбиту. Так называемые «синэнергетические орбиты» получаются при вертикальном старте с последующей коррекцией траектории в полете и придания ей горизонтального направления на нужной высоте. Расчет таких орбит, предложенных Обертом, ведут исходя из равенства потери энергии на сопротивление атмосферы и приращения потенциальной энергии. Очевидно, эти потери зависят от формы ракеты-носителя.

Можно выделить другой тип орбит, на которых в процессе полета меняется энергия аппарата. Эти орбиты имеют свои преимущества, но, разумеется, требуют больше топлива. Было установлено, что, даже если допустить возможность орбит с непрерывно меняющейся энергией, гомановская орбита останется самой экономичной (если пренебречь силами сопротивления атмосферы). Однако необходимо подчеркнуть другой серьезный недостаток гомановских траекторий. На них допускаются мгновенные изменения скорости и, следовательно, огромные ускорения, опасные как для приборов, так и для экипажа на борту аппарата. Кроме того, важно отметить, что незначительные ошибки при старте приведут к большим ошибкам в апогее, так что остается необходимой коррекция.

Подобные соображения объясняют, почему используются многоступенчатые ракеты: «мертвый» вес (отработанные ступени) сбрасывается сразу после прироста энергии, так что приобретенная энергия дает более эффективный вклад в рост орбитальной скорости.

В заключение этого раздела позвольте мне коснуться одного терминологического вопроса. К большому беспокойству пуристов-ученых радиокомментаторы и корреспонденты широко пользуются выражением «такой-то спутник вышел на орбиту или траекторию...». Разумеется, подобная фраза может вызвать лишь улыбку, поскольку любой аппарат во время всего полета от момента старта до возвращения на Землю или до его разрушения находится на орбите или траектории. Этим выражением хотят сказать (так бы и следовало говорить), что такой-то спутник, двигающийся по определенной траектории, перешел с одного ее участка (где благодаря действию стартовых ракет растет энергия аппарата) на другой. Обычно при этом имеют в виду: «на другой участок, где действует только тяготение», иными словами — «на ньютоновскую часть орбиты или траектории». Слово «орбита» служит обычно для обозначения замкнутого движения, когда спутник проходит последовательно несколько раз один и тот же путь; слово «траектория» имеет более общий смысл,

2. К Венере и Марсу

Сказанное о перелете с Земли на Луну (или на низкую круговую орбиту — для искусственных спутников Земли) можно отнести соответственно и к полету космического аппарата с орбиты Земли вокруг Солнца к другой планете солнечной системы, например к Марсу или Венере. С точки зрения небесной механики эта проблема более сложная, чем проблема выведения спутника Земли. Для расчета траектории мы должны вначале решить кеплеровскую задачу двух тел — Земли и ракеты; затем решить ту же задачу для системы Солнце и аппарат, причем сопряжение решений этих задач проводится в рамках задачи трех тел; в окрестности Марса осуществляют аналогичный переход к кеплеровской задаче двух тел: космический аппарат и Марс (то же относится к Венере или к любой другой планете); независимо рассматривается задача коррекции (с помощью неньютоновских сил) траектории.

Конечно, из-за сложности этой задачи мы не сможем привести здесь ее полное решение. Однако кое-что можно легко понять почти интуитивно.

Прежде всего, скорость запуска должна быть близка к параболической или больше ее (гиперболическая скорость): в этом случае небольшой дополнительной энергии достаточно для достижения орбиты Марса, расположенного в бесконечности по отношению к гравитационному полю Земли *.

В системе Солнце — космический аппарат начальная скорость аппарата в действительности будет по отношению к Земле гиперболической, к которой добавлена скорость орбитального движения Земли вокруг Солнца. Для параболической траектории эта скорость на бесконечности равна нулю; следовательно, орбита объекта, запущенного с Земли по параболической траектории, будет близка к орбите Земли. Различие между этими двумя орбитами возникло бы лишь вследствие несовпа-

* Автор хочет сказать, что Марс находится от Земли на столь большом расстоянии, что вблизи него поле тяготения последней не оказывает заметного влияния на движение космического аппарата.— *Прим. ред.*

дения барицентров систем Солнце — аппарат и Солнце — Земля.

Однако необходимо правильно выбрать переходную орбиту. Решая задачу покидания Земли, направление и величину начальной скорости следует выбрать так, чтобы аппарат вышел на гомановскую орбиту. Если предположить, что аппарат уже поднят на высоту H, то перед выходом на траекторию полета к Марсу аппарат можно перевести на околоземную орбиту или сразу же перевести на эту траекторию; его можно запустить и с промежуточной орбитальной станции, находящейся на круговой орбите: в любом случае мы можем считать, что задача, связанная с преодолением сопротивления атмосферы, решена. Гомановская орбита наиболее целесообразна для дальнейшего движения аппарата, уже достигшего высоты H; соответствующую скорость нетрудно вычислить: она равна сумме скорости на почти параболической геоцентрической орбите и характеристической гелиоцентрической скорости, и в системе, связанной с Солнцем, значительно отличается от параболической скорости. В гелиоцентрической системе координат параболическая скорость, соответствующая радиусу орбиты Земли, равна (см. выше стр. 35)

$$v_p = \sqrt{\frac{2GM_\odot}{D_\oplus}} \approx 42{,}1 \text{ км/с}, \qquad (13)$$

а характеристическая скорость для гомановской траектории Земля — Марс равна

$$v_{\text{хар}} = \sqrt{\frac{2GM_\odot}{D_\oplus} - \frac{GM_\odot}{D_{\text{Марс}}}} \approx 3{,}65 \text{ км/с}. \qquad (14)$$

На расстоянии, равном радиусу орбиты Марса, космический аппарат приобретает скорость (относительно Солнца)

$$v = (v_{\text{хар}} + v_\oplus)\frac{D_\oplus}{D_{\text{Марс}}} \approx 21{,}5 \text{ км/с}. \qquad (15)$$

Поскольку скорость орбитального движения Марса равна

$$v = 2\pi \frac{D_{\text{Марс}}}{T_{\text{Марс}}} \approx 24 \text{ км/с}. \qquad (16)$$

скорость аппарата относительно Марса будет равна $24{,}0 \pm 21{,}5$ км/с. Нижний знак соответствует более предпочтительному случаю; тогда $v \approx 2{,}5$ км/с.

Заметим, что аппарату предстоит еще войти в гравитационное поле Марса и достичь поверхности планеты. Если предположить, что траектория аппарата проходит далеко от Марса, на расстоянии, где параболическая

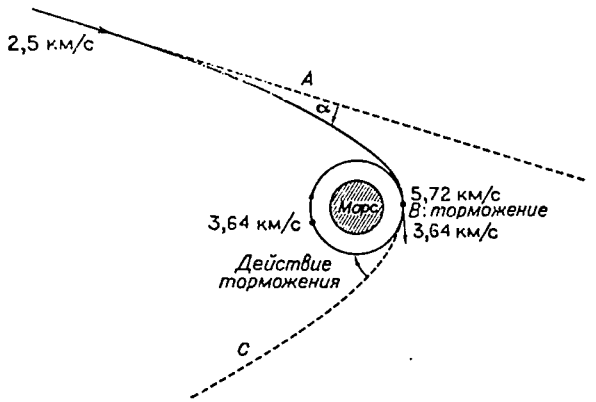


Рис. 21. Маневр торможения, необходимый для перехода космического аппарата на круговую орбиту спутника Марса Траектория A по отношению к Марсу представляется почти прямой линией, хотя относительно Солнца она является дугой эллипса. Траектория A отклоняется вследствие притяжения Марса на угол α. C — часть ареоцентрической гиперболической траектории, по которой двигался бы аппарат без торможения.

скорость меньше 2,5 км/с (т. е. превышающем 3 радиуса Марса), то эту траекторию необходимо будет изменить. На поверхности Марса параболическая скорость составляет 5,15 км/с (рис. 21). Следовательно, начальная энергия должна быть уменьшена торможением аппарата; если мы хотим достичь поверхности планеты, уменьшение энергии при торможении должно соответствовать скорости $\sqrt{5{,}15^2 + 2{,}5^2} = 5{,}72$ км/с, в точности равной скорости, необходимой для того, чтобы вывести аппарат на гиперболическую орбиту, в бесконечно удаленной точке которой скорость равна 2,5 км/с. Если же мы хотим лишь вывести аппарат на очень низкую круговую

орбиту вокруг Марса, то относительную ареоцентрическую скорость следует довести до величины 3,64 км/с; таким образом, для выхода на такую орбиту необходимо уменьшить скорость на 5,72 — 3,64 = 2,08 км/с.

Задача перелета к другим планетам рассматривается аналогично. Отметим, что для внутренних планет, таких, как Венера, перелет Земля — Венера анало-

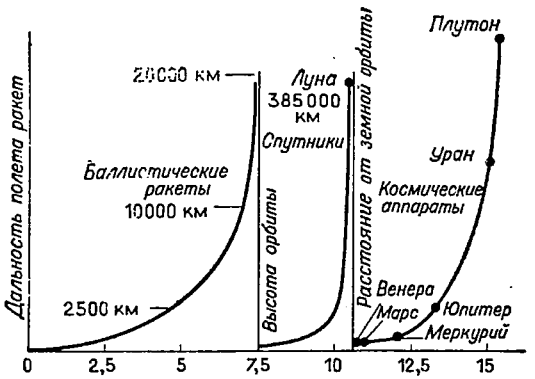


Рис. 22. Связь между начальной скоростью и дальностью перелета космического аппарата.

гичен обратному полету Марс — Земля, который можно рассмотреть так же, как и предыдущий пример, изменив лишь направление скорости на противоположное.

На рис. 22 изображена зависимость величины стартовой скорости от расстояния конечной цели полета.

3. Применение двойных маневров

В подобных задачах существует общая закономерность: невозможно обойтись без искусственных ускорений — дополнительно к гравитационным, — которые придаются аппарату в определенных точках траектории. Эти добавочные ускорения следует сообщать аппарату как можно ближе к притягивающему центру, поскольку при этом увеличивается прирост кинетической энергии, пропорциональной v^2; этот прирост тем больше, чем

ближе точка коррекции к перицентру орбиты, в котором, согласно закону площадей, скорость наибольшая.

Рассмотрим эту точку и оценим эффективность операции коррекции. Обозначим через v_1 и v_2 скорости со-

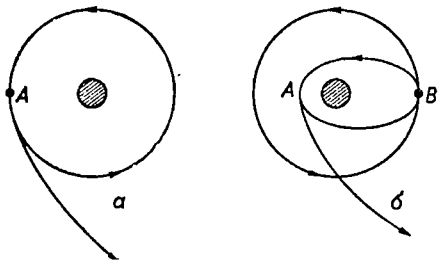


Рис. 23. Как сойти с круговой орбиты и удалиться в бесконечность.

ответственно до и после приложения импульса. Тогда разность энергий будет равна

$$\delta E = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)\, m = v\delta v m, \tag{17}$$

поскольку потенциальная энергия не изменяется. Но для сообщения импульса необходимо затратить энергию

$$\delta' E = \frac{1}{2}(v_2 - v_1)^2 m = \frac{1}{2}(\delta v)^2 m. \tag{18}$$

Следовательно, эффективность можно определить отношением

$$\frac{\delta E}{\delta' E} = \frac{v_1 + v_2}{v_2 - v_1} \approx 2\frac{v}{\delta v}. \tag{19}$$

При заданном δv, или $\delta' E$, эффективность возрастает с увеличением v. Это свойство лежит в основе предложенных методов использования *двойных маневров*; для иллюстрации сути этих методов обратимся к примеру, рассмотренному Берманом.

Предположим, что мы хотим решить следующую задачу: перевести космический аппарат, находящийся на круговой орбите, в бесконечность по параболической или гиперболической траектории. Простейшее решение дается траекторией типа *а* (рис. 23), в единственной точке *A*,

которой сообщается ускорение. Существует другое решение, типа *б*, в котором коррекция производится дважды: в точках A и B. В маневре *а*

$$\delta v_A = v_{\text{круг}} - v_{\text{гип}}, \tag{20}$$

а в маневре *б*

$$\delta v_B = (v_{\text{круг}} - v_{\text{элл. }B}) + (v_{\text{гип}} - v_{\text{элл. }A}). \tag{21}$$

Энергия ракеты на гиперболической орбите равна

$$E = \frac{1}{2} m v_{\text{гип}}^2 - E_{\text{потен}} = \frac{1}{2} m v_\infty^2 \quad \left(E_{\text{потен}} = \frac{GM_\oplus}{r_A}\right), \tag{22}$$

откуда

$$v_{\text{гип}} = \sqrt{v_\infty^2 + \frac{2GM}{mr_A}}. \tag{23}$$

Понятно, что в выражение (21) входят различные скорости, соответствующие точкам A и B эллиптической орбиты:

$$v_{\text{элл. }A} = \sqrt{GM\left(\frac{2}{r_A} - \frac{2}{r_B + r_A}\right)} \tag{24}$$

и

$$v_{\text{элл. }B} = \sqrt{GM\left(\frac{2}{r_B} - \frac{2}{r_B + r_A}\right)}. \tag{25}$$

Скорость на круговой орбите $v_{\text{круг}} = \sqrt{GM/r_B} = v_{\text{п}}\sqrt{2}$.

Таким образом приращение скорости в маневре *б* равно, как нетрудно вычислить,

$$\delta v_б = v_{\text{круг}}\left[1 - \sqrt{2\left(\frac{r_B}{r_A} + 1\right)} + \sqrt{2\left(\frac{r_B}{r_A} + \frac{v_\infty^2}{v_{\text{п}}^2}\right)}\right]. \tag{26}$$

С другой стороны, для более простого маневра типа *а*,

$$\delta v_a = v_{\text{круг}}\left[-1 + \sqrt{2\left(1 + \frac{v_\infty^2}{v_{\text{п}}^2}\right)}\right]. \tag{27}$$

Соотношение (26) получается из (27) если положить $r_A = r_B$. Величина $\Delta = \delta v_б/\delta v_a$, которая определяет

эффективность двойного маневра, зависит от параметров

$$\alpha = 2\left(1 + \frac{v_\infty^2}{v_\text{п}^2}\right) \tag{28}$$

и

$$\beta = 2\left(\frac{r_B}{r_A} + 1\right). \tag{29}$$

Отсюда

$$\Delta = \frac{1 - \sqrt{\beta} + \sqrt{\beta + \alpha - 4}}{\sqrt{\alpha} - 1}. \tag{30}$$

Рассмотрим некоторые частные случаи. Прежде всего при $v_\infty/v_\text{п} \approx 0$ (окончательная траектория — параболическая) $\alpha = 2$ и эффективность двойного маневра зависит только от β:

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{2} - 1}(1 - \sqrt{\beta} - \sqrt{\beta - 2}), \tag{31}$$

и возрастает с увеличением β. При изменении r_B/r_A от единицы до бесконечности Δ изменяется от 1 до $1/(\sqrt{2} - 1)$. С ростом α (гиперболическая окончательная траектория) эффективность двойного маневра (при равных значениях β) падает. Если $\alpha \to \infty$, то $\Delta \to 1$ независимо от значений β. Таким образом, двухимпульсный переход типа *б* всегда предпочтителен, тем более, когда конечная скорость приближается к параболической, а промежуточная орбита имеет, насколько возможно, низкий перигей A; лишь ограничения, связанные с другими факторами, в основном с сопротивлением атмосферы, не позволяют располагать точку выведения слишком низко.

4. Сложные орбиты

Очевидно, задачи, рассмотренные выше, крайне усложнятся, если их решать в рамках задачи n тел, учитывать вращение планет и планетоцентрическую широту ракеты в каждый момент времени. В качестве примера приведем геоцентрическую траекторию «Пионе-

ра-4», хорошо знакомого астрономам, поскольку он часто упоминается на ежегодных конгрессах КОСПАР; кроме того, на рис. 24 показана траектория «Луны-3»,

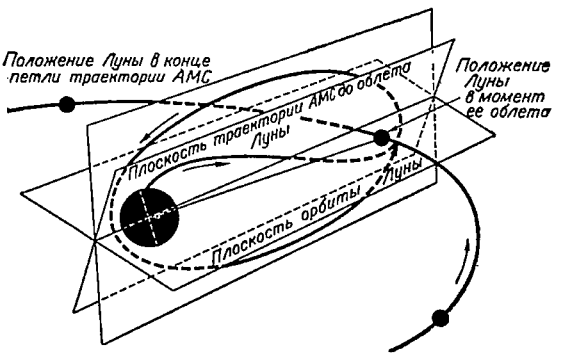


Рис. 24. Траектория «Луны-3» в системе координат, связанной с положением Луны в момент ее облета (ТАСС).

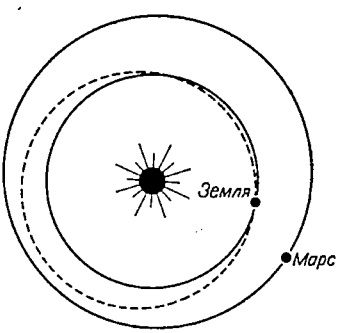


Рис. 25. «Проекция траектории «Луны-1» на плоскость эклиптики (по Доманже и Мюллеру).

огибающая Луну. Естественно, такие траектории имеют более простой вид в гелиоцентрической системе координат, в чем нетрудно убедиться на примере «Луны-1» (рис. 25).

Входить глубже в детали здесь не представляется возможным.

5. Влияние ошибок выведения

Выше мы упомянули о важности проблемы исправления ошибок выведения посредством коррекции орбиты, проводимых по командам с наземных станций слежения, или, если аппарат с экипажем, самими астронавтами. Разумеется, расчет коррекций, которые могут потребоваться, должен проводиться до полета. В одних случаях достаточно лишь небольшого изменения траектории, в других — требуется более значительная коррекция. Мы не имеем возможности обсуждать эту проблему в общем виде и ограничимся одним простым примером. Предположим, что ошибка в величине скорости и угле выведения (отсчитываемого от горизонтального направления) составляют 1% и 1° соответственно. Каковы будут ошибки в расстояниях апогея и перигея? Величина скорости выведения находится из равенства

$$\frac{2GM_\oplus}{R_\oplus + H} - v_0^2 = \frac{1}{R_a} GM_\oplus. \tag{32}$$

На круговой орбите $R_a = R_\oplus + H$, что приводит к теоретическому значению $v_0 = v_{\text{круг}}$. Нетрудно убедиться, что

$$\frac{R_a - (R_\oplus + H)}{R_\oplus + H} = \frac{\delta v_0^2}{v_0^2} = 2\frac{\delta v_0}{v_0} = 0{,}02. \tag{33}$$

Если точка выведения совпадает с одним из концов главной оси, то при уменьшении скорости выведения на 1% высота перигея уменьшится на 2% (при небольших высотах H, не превышающих 140 км). Таким образом, необходима очень высокая точность выведения. Ошибка в величине угла выведения приведет к ошибке в значении эксцентриситета e. В приведенном выше случае V_0 можно, вообще говоря, найти из равенства

$$e^2 = 1 - \sin^2 V_0 = \cos^2 V_0. \tag{34}$$

Следовательно,

$$de = -\sin V_0\, dV_0 \tag{35}$$

и

$$\left|\frac{de}{e}\right| = \frac{\sin V_0}{\cos^2 V_0} dV_0. \tag{36}$$

В окрестности $V_0 = \pi/2$ имеем

$$\sin V_0 \approx 1, \quad \cos^2 V_0 \approx \left| \frac{\pi}{2} - V_0 \right|^2,$$

поэтому ошибка очень мала.

При идеальном выведении $e = 0$; ошибка в 1° приводит к значению эксцентриситета $e = 0{,}003$. Следовательно, ошибка в $r_{\max}$ и $r_{\min}$ равна

$$(R_\oplus + H)\, e \approx 0{,}00029 R_\oplus,$$

т. е. апогей и перигей изменятся на 0,03%, что составляет ~ 2 км.

Ясно, что подобные расчеты совершенно необходимы при рассмотрении полетов к Венере или к Марсу. В этом случае ошибки могут быть очень значительными, поскольку цель очень удалена.

Однако мы уже достигли замечательных успехов в овладении методами таких расчетов: из табл. 2 (стр. 153), где приведено большое количество удачных запусков, это видно очень хорошо.

6. Заключение

Самые большие электронные вычислительные машины космических центров СССР и США (а также Европы и — в ближайшем будущем — других стран) круглосуточно работают, рассчитывая орбиты текущих и планируемых полетов. В этих сложных непрерывных вычислениях используются горы перфокарт и магнитных лент. Отметим, что такие расчеты, в которых с высокой точностью вычисляются все возмущения и, разумеется, учитывается возможное изменение плоскости орбиты под влиянием каждого возмущения, значительно усложняют задачу. Читатель должен понять, что мы попытались лишь ориентировать его в этой области науки. Благодаря искусственным спутникам и планетам небесная механика Лагранжа и Леверрье получила великолепное поле для приложений, требующих как тонкости, так и точности, в которых расчеты прокладывают путь для дальних экспедиций Магелланов космического пространства. Космические исследования

представляют яркий пример фундаментальных изысканий, «полезность» и «эффективность» (столь дорогие для финансовых инспекторов) которых можно оценить лишь много времени спустя. Мог бы Лагранж получить лаборатории, материальные фонды и поддержку, которыми пользовались математики НАСА с 1967 г.? Без сомнения, нет. Кроме того, такая задача и не ставилась. Однако этот урок следует серьезно изучить современным правительствам, колеблющимся иногда в оказании поддержки «чистым» исследованиям и полных страстного желания планировать «рентабельные» эксперименты.

ГЛАВА IV

ЧТО ТАКОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИКА?

Изучение движения спутников и космических зондов, проводимое методами небесной механики, позволяет получить информацию о силах, действующих на эти аппараты; причем, как мы уже видели, не только о гравитационных силах. Но в действительности искусственные небесные тела отличаются от естественных тел — если речь идет об их собственной природе.

Хотя очень важно знать, как внешняя среда воздействует на небесные светила, необходимо также изучить, как эти светила реагируют на внешние влияния, которые обусловливают их собственную природу. Это первый довод за то, чтобы попытаться создать в естественной окружающей среде искусственные небесные тела, похожие по своим свойствам на реальные объекты. Разумеется, это не могут быть звезды или планеты. Поэтому более разумным представляется идея о создании искусственных комет и метеоров. Конечно, реальные кометы и метеорные тела появляются очень близко от Земли и иногда даже входят в атмосферу, где они прекращают существование вследствие взрыва или испарения. Таким образом, создавая искусственные кометы и метеориты, мы убиваем сразу двух зайцев. Мы можем изучить поведение объекта под действием внешних условий, повторяя эксперимент несколько раз, и получить намного больше сведений, чем при изучении естественных объектов, природу которых мы еще плохо знаем, и, появление которых, кроме того, непредсказуемо. Тем самым мы расширим наши знания об окружающей среде. Кроме того (что, возможно, более важно), нам станет яснее природа настоящих комет и метеоров. Это и будет основным шагом вперед.

Первое практическое предложение экспериментов этого типа принадлежит Ф. Цвикки.

Хорошо известно, как много чрезвычайно интересных результатов было получено при изучении естественных

метеорных частиц с помощью космических аппаратов. Цвикки предложил создавать искусственные метеорные дожди. Первая попытка, сделанная в 1946 г., была неудачной, но последующие эксперименты увенчались успехом — и с тех пор аналогичные работы были продолжены другими авторами. Суть задачи состоит в том, чтобы из головной части ракеты выбросить самосветящиеся предметы. Для этой цели было предложено использовать реакцию алюминия с окисью железа ($2Al + Fe_2O_3$). Выбрасывание производится на высоте 60 км. С помощью таких экспериментов можно в принципе проверить теорию разрушения метеоров и метеорных тел в атмосфере, а также теорию их испарения. По результатам экспериментов легко оценить минимальные размеры наблюдаемых метеорных тел, что позволяет более правильно объяснить результаты наблюдений за естественными метеорами.

Мы фактически рассматриваем здесь проблему осуществления и изучения явления искусственных «метеоров», а не искусственных «метеоритов»; природа самого объекта едва ли сложна (рис. 26).

Мы намного меньше продвинулись в изучении комет. Следует учесть, что кометы — редкие объекты, в то время как метеорные частицы и тела достаточно плотно заполняют межпланетное пространство. С помощью космических аппаратов можно надежно изучить распределение и свойства метеорных тел, однако, хотя вопрос об исследовании комет с близко пролетающих космических аппаратов уже рассматривался, еще не было сделано ни одной попытки, что, несомненно, связано с большими трудностями.

Задача создания искусственных комет находится в пределах практических возможностей.

Среди проблем, связанных с природой комет, которые можно решить с помощью подобных проектов, упомянем следующие.

Когда комета (эксцентриситет орбиты которой очень велик) приближается к Солнцу, из нее выделяются различные газы и пары, а быстрое изменение физических и химических условий, в которых оказывается комета,

приводит к образованию в выброшенном газе ионов и свободных радикалов. Интенсивность свечения головной

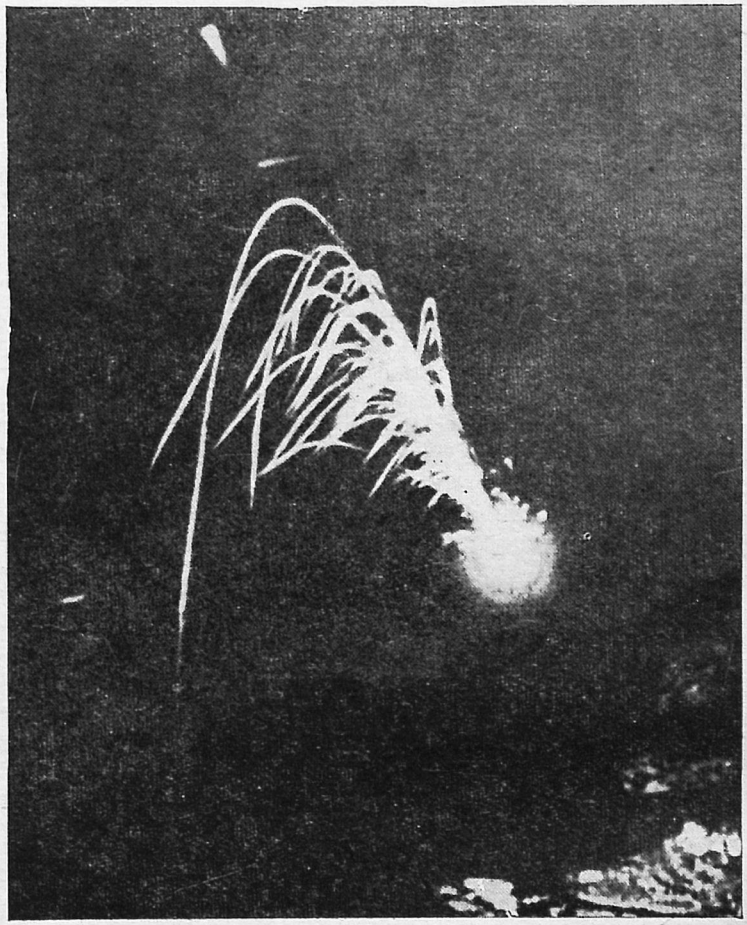


Рис. 26. Искусственные метеоры (по Цвикки).

части кометы также зависит от этих условий. Угловой размер головной части искусственной кометы трехметрового диаметра, двигающейся по стационарной круговой

орбите* ($H \approx 36\,600$ км), составляет 0,5°, ее яркость не выше 10-й величины. По-видимому, этот эксперимент вполне осуществим. Несколько кусков льда, выведенных на подобную орбиту, будут существовать, согласно некоторым авторам, несколько дней, но, согласно другим утверждениям, лед испарится настолько быстро, что трудно будет провести эксперимент.

До осуществления этих исследований оказалось возможным создать в межпланетном пространстве искусственные облака ионов. Изучался вопрос о выведении на орбиту щелочных металлов — подобный эксперимент уже ставился для геофизических целей. На высоте 200 км уже были созданы облака аммиака (NH_3). По фотографиям и спектрограммам (Вурм, Розе) было установлено, что в расширяющемся слое облака не происходит диссоциации молекул аммиака NH_3 под действием ультрафиолетовой части солнечного излучения, что, оказывается, имеет место в кометных хвостах. Этот отрицательный результат позволил определить пределы вероятности диссоциации NH_3 в ультрафиолетовых лучах и вероятности флуоресцентного возбуждения NH_2 под действием солнечного излучения, точнее — произведение этих двух вероятностей: возможно, что диссоциация не сопровождалась появлением резонансной линии радикала NH_2 в области между 5000 и 7000 Å. Рассматривался также вопрос о выведении молекул других газов, например CO_2 и водяного пара H_2O.

Вероятно, в будущем подобные исследования получат значительное развитие. По существу, кометы представляют интерес с двух точек зрения: как объекты для физико-химических исследований и как источники информации о солнечной активности, поскольку, например, «солнечный ветер» (т. е. поток частиц высокой энергии) оказывает влияние на форму, размеры и расположение хвоста кометы. Эти эксперименты, несмотря на трудности, связанные с их проведением, представляют большой интерес.

* Эта орбита совершенно непохожа на орбиты реальных комет; с ее помощью можно лишь изучить поведение искусственной кометы, имитирующей реальную комету, находящуюся на том же расстоянии от Солнца, что и Земля.

ГЛАВА V

ПРЯМЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНЕЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

1. Прямое исследование Луны

В табл. 2 (стр. 153) отражены основные фазы исследования Луны: попадание в Луну («Луна-2»), фотографирование обратной стороны («Луна-3», «Лунар Орбитер» и др.), фотографирование с высоким разрешением («Рейнджеры»), фотографирование крупным планом поверхности («Луна-9»), вывод на окололунные орбиты («Луна-10», «Лунар Орбитер» и др.), попытки анализа механических и химических свойств лунного грунта («Сервейоры»), полет к Луне пилотируемых аппаратов и выход человека на поверхность Луны («Аполлон-11»), доставка на Землю образцов лунных пород и многие другие эксперименты. Нет сомнений, что за время между написанием этого раздела и его чтением будут выполнены другие исследования, так что многое из написанного ниже окажется устаревшим.

Какие проблемы были решены с помощью этих запусков? Далее, какие проблемы могут быть исследованы в будущих или по крайней мере ближайших пусках?

Мы знаем, что Луна является самым большим (относительно своей планеты) спутником в солнечной системе. В настоящее время Луна уже не единственный спутник Земли (поскольку на орбиты уже выведено достаточно много искусственных спутников!), но она все еще остается самым большим и наиболее интересным из спутников. Масса Луны столь мала, что около нее не может удержаться сколько-нибудь заметная атмосфера, даже если бы она и появилась. Вследствие этого Луна долгое время считалась «мертвым» телом. Галилей открыл существование лунного рельефа; его наблюдения положили начало лунной картографии, которая продолжала разрабатываться (с наземных обсерваторий)

и смогла удовлетворить возродившийся интерес к проблемам Луны, вызванный прогрессом астронавтики. Максимальная разрешающая способность (ограниченная влиянием атмосферы Земли и размерами существующих инструментов) соответствует расстояниям в 1—2 км на Луне. Детали с меньшими размерами различить нельзя. По измерениям отраженного от Луны электромагнитного излучения (во время затмения, в инфракрасном и радиодиапазонах) удалось определить температуру, теплопроводность, а по изучению поляризации отраженного излучения — микроструктуру поверхностного слоя. Фотометрия кратеров позволила детально изучить топографию Луны. С точки зрения астрометрии и небесной механики, Луна, единственный спутник Земли, имеет очень важное значение: изучение движения ее по орбите позволяет определить отношение масс Солнца и Земли; теория движения Луны дает возможность исследовать задачу о возмущениях от третьего тела (Солнца); наконец, теория приливов тесно связана с исследованием эволюции орбиты Луны, а прецессия земной оси связана с влиянием притяжения Луны и Солнца.

Проблема происхождения Луны и образования ее рельефа всегда представляла интерес для теоретиков. Отделилась ли Луна от Земли? По-видимому, согласно законам механики, этот процесс невозможен. Более вероятно, что Луна образовалась в процессе конденсации пыли внутри облака, окружавшего Солнце в момент ее рождения. Могли бы возникнуть кратеры благодаря вулканическим извержениям? Спектроскопические исследования, выполненные Н. А. Козыревым, показали, что в кратере Альфонс внезапно возникло слабое, но все же заметное излучение, резко обрывающееся у λ 4740 Å и сосредоточенное в «красной» стороне от этой волны (рис. 27). Это излучение соответствует полосе молекулы углерода C_2. В кратере Альфонс зарегистрировано несколько извержений такого типа, что может служить еще одним доводом в пользу внутреннего происхождения этих облаков пепла.

Но действительно ли это вулканическое извержение? Об этом пока нельзя судить с определенностью. Темпе-

ратура пепла невысока, а анализ показывает, что он светится только в ходе флуоресценции (эти доводы остаются пока весьма спорными). Многие астрономы приводят весьма веские доводы в пользу «метеоритного» происхождения; при этом они ссылаются на данные лабораторных экспериментов, при которых дела-

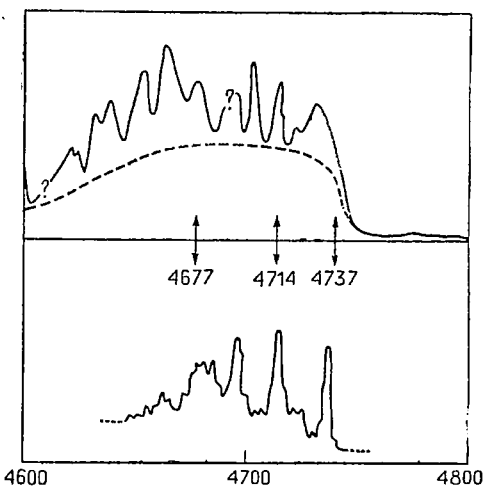


Рис. 27. Спектр излучения, наблюдавшегося в кратере Альфонс (по Козыреву). *Вверху* — наблюдения Козырева; *внизу* — спектральная полоса молекулы углерода C_2. Заметно хорошее совпадение пиков излучения.

лись попытки воспроизвести процесс образования кратеров при соударениях различных материалов, которыми бомбардируют разные цели. Убедительные результаты (даже чересчур убедительные для современного уровня знаний), показывают, как много еще нерешенных проблем. Кроме того, можно показать, что между глубиной и диаметром кратера существует такая же зависимость (рис. 28), как и у воронок, образовавшихся в результате взрывов бомб на Земле. С другой стороны, земные метеоритные кратеры не показывают такой зависимости. Является ли это аргументом против метеоритной теории лунных кратеров? Скорее всего, нет, так как за долгое

время вследствие эрозии земные образования сгладились, а впадины засыпаны, что, вероятно, составляет отличие земной поверхности от лунной, где эрозия происходит значительно медленней (рис. 28). Но все-таки сравнение формы и структуры земного вулканического рельефа с лунным не очень убедительно. До тех пор

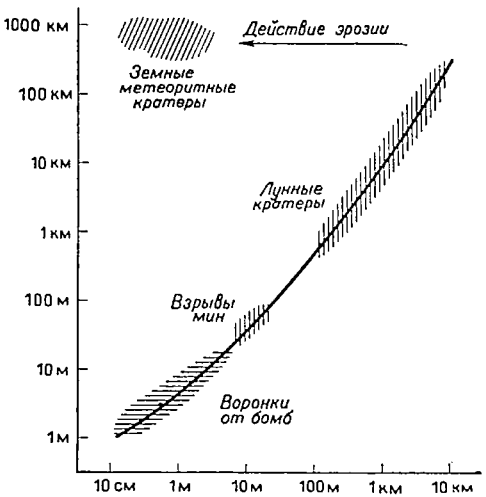


Рис. 28. Связь между размером кратера (ордината) и его глубиной (абсцисса) (по Болдуину). Обратите внимание на влияние эрозии на размеры земных метеоритных кратеров.

пока не будет произведено прямого исследования, вопрос о происхождении кратеров останется открытым: внутреннее, вулканическое, или внешнее, метеоритное? Или имеют место оба явления?

Теперь посмотрим, как на эти вопросы ответили космические исследования.

А. Лунная топография. Исследования в целом

Одним из первых результатов советских и американских космических экспериментов явилось построение крупномасштабной топографической карты всей поверхности Луны. Заметим, что вопреки распространенному мнению с Земли мы видим больше 50% лунной поверх-

ности. В самом деле, хотя Луна действительно повернута к нам одной стороной, она совершает колебательное движение относительно среднего положения. Это колебание складывается из: а) собственно колебательного движения; б) сложного движения, состоящего из равномерного вращения Луны и ее движения по орбите с заметным эксцентриситетом, и в) несовпадения плоскости экватора Луны с плоскостью ее орбиты. Вследствие этих эффектов (объединенных под общим названием «либрация») с Земли видно 59% поверхности Луны, однако они при наблюдениях с Земли были изучены плохо, так как области, близкие к границе лунного диска, имеют относительно малые размеры.

Полет «Луны-3» (4 окт. 1959) позволил получить сведения об основной (правда, не всей) части из невидимых с Земли 41% поверхности Луны, включая и некоторые известные образования. Полет «Зонда-3» и последующие полеты лунных спутников «Лунар Орбитер» подняли наши знания о невидимой стороне на уровень, соответствующий изученности видимой части; на рис. 29 приведена фотография части невидимой стороны Луны (небольшая ее часть еще осталась необследованной). Обратим внимание на удивительное темное образование — кратер Циолковский. На других фотографиях можно различить, например, кратеры Жюль Верн, Море Восточное с концентрическими горными цепями, разделенными кольцами долин; в изобилии заметны кратеры и окруженные валами равнины.

Уже первые опубликованные фотографии показали, что топография двух сторон Луны — видимой с Земли и противоположной — совершенно различна. На фотографиях, доставленных на Землю «Зондом-3», а также полученных со спутников «Лунар Орбитер», меньше темных долин-морей, больше светлых материков, а горные структуры богаче кратерами.

Можно ли понять причину этих различий? Развернулась напряженная дискуссия о том, что происходит на одной стороне Луны и не происходит на другой. Речь идет не о влиянии затмений, которые происходят только на стороне Луны, обращенной к Земле, и сопровождаются резкими колебаниями температуры, поскольку

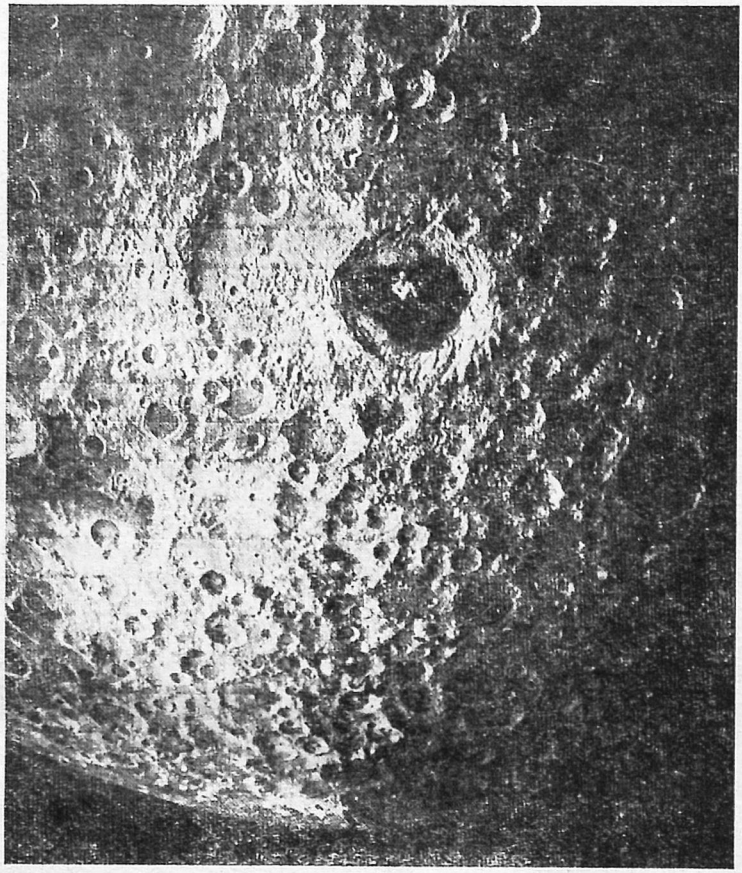


Рис. 29. Обратная сторона Луны (фотография «Лунар Орбитер-3» 19 февраля 1967 г.). Эта часть Луны, не наблюдаемая непосредственно с Земли, впервые была исследована советскими космическими зондами в 1959 г. На снимке виден кратер Циолковский с очень темным дном.

эти колебания вследствие низкой теплопроводности лунного грунта проникают неглубоко. Другое различие, состоящее в том, что на видимой стороне имеют место приливы, вызываемые притяжением Земли, также не выглядит очень существенным. Однако эти приливы, возможно, играли значительную роль в прошлом, когда Луна находилась ближе к Земле, что, впрочем, также не имеет неоспоримых подтверждений. Экранирующее влияние Земли, препятствующей падению метеоритов на видимую сторону Луны, тоже очень слабо: количество метеоритов, задерживаемых Землей, заведомо не превышает 1/1000 от общего числа метеоритов, падающих на Луну. В действительности Земля также очень несимметрична по своим свойствам, как и Солнце и другие планеты: наблюдаемая асимметрия Луны, несомненно, не выходит за рамки предполагаемой a priori наиболее «вероятной» асимметрии.

Добавим, что специальная комиссия Международного астрономического союза разрабатывает в настоящее время классификацию образований, открытых последними исследованиями лунной поверхности.

Б. Мелкая структура поверхности Луны

Существенно иная информация была получена на аппаратах типа «Рейнджер» (7, 8 и 9). С их помощью проводилось фотографирование Луны вплоть до момента удара аппарата о поверхность Луны. Полученные результаты широко обсуждались, и мы изложим лишь основное.

Наиболее мелкие различимые детали на этих фотографиях соответствуют разрешению в несколько сантиметров.

Помимо кратеров, наблюдаемых с Земли, обнаружено много небольших кратеров; количество наблюдаемых кратеров возрастает с увеличением разрешения. На рис. 30 показано, как количество кратеров зависит от их размеров. Эти цифры, выведенные из данных, полученных на «Рейнджере-7» в Море Познанном, соответствуют площади 10^6 км^2 и периоду 10 лет (фактическое число, приходящееся на 10^6 км^2, было поделено на 4,5, так как возраст Луны принят равным возрасту Земли,

т. е. $4{,}5 \cdot 10^9$ лет). Кроме того, области, где из кратеров, подобных кратеру Тихо, исходят лучи, более чем в 10 раз богаче кратерами, чем области, расположенные между лучами, как это видно из рис. 30.

Обработка статистических данных и тщательное исследование подробностей, показали, что необходимо различать кратеры первичные, к которым относятся в

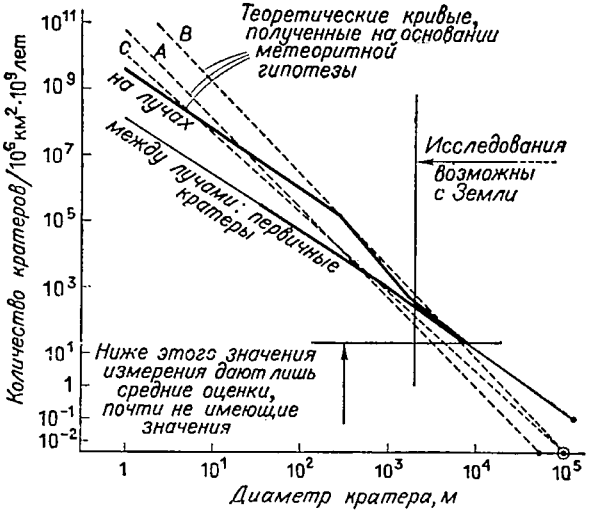


Рис. 30. Связь между количеством и размером наблюдаемых кратеров. Сплошная линия построена по результатам измерений.

основном кратеры, наблюдаемые между лучами, и вторичные, находящиеся на лучах и образованные вследствие падения отдельных осколков, выброшенных из первичных кратеров. В большинстве случаев первичные кратеры имеют плавные, четко выраженные границы, близкие к окружностям; вторичные кратеры имеют более неправильную форму, часто со сложной структурой и нередко соединены с другими вторичными кратерами.

Независимо от масштаба снимка первичные кратеры часто можно отличить по имеющимся лучам, образованию вторичных кратеров. Таким образом, обработка полученных по наблюдениям кривых общего числа кра-

теров позволяет построить кривую, соответствующую количеству первичных кратеров, которые можно однозначно определить только в окрестностях лучей очень крупных кратеров.

Статистическая обработка дает веские аргументы в пользу метеоритной гипотезы. Гипотеза чисто вулканического происхождения допускает определенный «порог»: согласно этой гипотезе, существование очень маленьких кратеров невозможно. С другой стороны, при современном уровне знаний о метеорных телах в солнечной системе можно вычислить количество падений метеоритов на Луну за единицу времени в зависимости от размеров метеорных тел. При этом приходится вводить несколько гипотез. Прежде всего — гипотезу, относящуюся к скорости падения метеорита на Луну: соотношение между размерами кратера и метеорита определяется энергией последнего в момент удара, которая является основным параметром. Неизвестно также соотношение между размером метеорита и энергией удара: эта энергия ($mv^2/2$) связана с размером r_m метеорита в предположении, что метеорит — однородное твердое тело с плотностью ρ; для сферы радиуса r_m масса $m = \frac{4}{3}\pi r_m^3 \rho$, следовательно, величина r_m пропорциональна кубическому корню из энергии (случай *C* на рис. 30). Но если в метеорных телах имеются полости или неоднородности, соотношение между массой m и радиусом r_m изменяется: масса m может оказаться пропорциональной более высокой степени r_m, если предположить, что крупные метеорные тела имеют бóльшую плотность. На рис. 30 (*A* и *Б*) представлен случай, когда $m \sim r^{3,4}$. Напомним, что размер кратера определяется только энергией метеорита и не зависит от массы, размера и скорости последнего, взятых по отдельности.

На рис. 30 показано, что метеоритная теория дает правильный порядок величин, но предсказывает заниженное количество больших кратеров. Следовательно, необходимо дальше развивать теорию и получать новые статистические данные. Существует гипотеза, которая могла бы объяснить разницу между этими двумя

кривыми. Прежде всего среди больших кратеров должны встречаться кратеры вулканического, или, более точно, внутреннего происхождения. Напротив, некоторые из малых кратеров, образованных падением метеорных тел (их тем больше, чем меньше размер кратеров), должны были постепенно разрушаться, покрываясь слоем микрометеоритов или лунной «пыли», возникшей в результате как падений метеоритов, так и внутренних процессов. Ниже станет ясно, почему я написал «пыли» в кавычках.

Согласно этой гипотезе, вторичные кратеры возникли от ударов осколков, выброшенных с лунной поверхности упавшими метеоритами, образовавшими первичные кратеры. Количество вторичных кратеров n_s, образованных при возникновении первичных кратеров, оценивается на основании имеющихся данных наблюдений, касающихся достаточно крупных кратеров ($r > 400$ м), расположенных вдоль лучей и между лучами хорошо известного кратера Тихо. Это количество зависит от радиуса r_p первичного кратера; установлено, что $n_s \sim r_p^{-s}$, где s немного меньше 4. Этот «закон», возможно, несколько произволен, так как в нем используется экстраполяция ряда измерений, произведенных в небольшой области; возможно, что этот «закон» зависит от физических свойств грунта (твердость, плотность) в тех областях, где образовались первичные кратеры. Более того, то же самое можно сказать о всех аспектах этой теории! Тем не менее, применяя этот закон, можно определить количество первичных кратеров (которому на рис. 30 соответствует сплошная линия) из общего числа замеченных кратеров. В итоге, сравнивая две непосредственно связанные величины: количество первичных кратеров данного размера и количество метеоритов данной энергии, — мы можем дополнить эту теорию.

В. Природа лунного грунта

Конечно, благодаря экспериментам, произведенным в последнее время, мы знаем о поверхности Луны значительно больше, чем раньше, однако следует отметить, что, несмотря на скороспелые выводы (в том числе и с оттенком сенсационности), появившиеся в прессе, от-

крытия, сделанные с помощью советских и американских космических аппаратов, в целом подтверждают выводы, которые можно сделать на основании наблюдений, проведенных на Земле и, по крайней мере в настоящее время, не вызывают революции в астрономических законах.

Приведем несколько примеров.

Прежде всего удалось получить важную информацию, наблюдая кратеры при различных условиях освещения (в разных фазах Луны): было твердо установлено существование *эрозии*: некоторые кратеры перекрывают друг друга, рельеф других ровный и округленный; у отдельных кратеров (как, например, у кратера Коперник) обнаруживаются четко очерченные валы с крутыми вершинами (по Дольфюсу). Существование этой эрозии, очевидно, никак не связано с движениями воды и воздуха, как это имеет место на Земле. Телескопические исследования Луны показали, что происходит пластическая деформация скальных пород под влиянием локальных флуктуаций температуры, а также мельчайших метеорных частиц.

Из других видов лунных образований были исследованы центральные пики кратеров, невысокие горы (внутреннего происхождения?), встречающиеся, впрочем, довольно редко. Лучи и борозды, прямые или извилистые трещины, светлые складки, отвесные скалы... Гипотезы, развитые для объяснения каждого из этих образований, опираются, в основном, на предположение об их внутреннем происхождении. Кроме того, производились наблюдения материала поверхностного покрова. Начнем с того, что его окраска неоднородна. Темные моря, яркие венцы, окружающие большие кратеры, очень яркая окраска внутренней поверхности самых молодых кратеров — все это, несомненно, связано с отражательной способностью грунта. Но чем объясняются такие различия? Расхождением в структуре грунта или в его возрасте?

Поляризационные исследования Луны показали, что существует слабая зависимость поляризации от выбранной точки, в частности от ее альбедо. Лио и затем Дольфюс строго показали, что поляризация лунного грунта

изменяется в функции угла падения световых лучей по такому же закону (см. гл. VI, стр. 119), «которому подчиняется поляризация мелкозернистой россыпи вулканического пепла». Дольфюс недавно установил, что остаточная поляризация лунного грунта, освещенного Землей (а не Солнцем), точно так же зависит от альбедо, как и остаточная поляризация вулканического

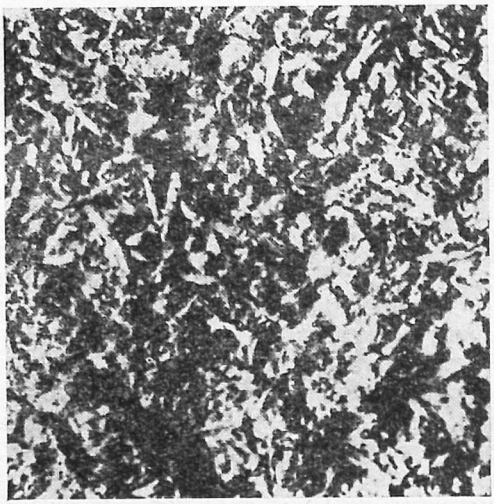


Рис. 31. Структура искусственного грунта, имеющего те же оптические характеристики (поляризация, рассеяние), что и лунный грунт (по Дольфюсу).

пепла — при прочих равных условиях. На рис. 31 показан образец вулканической пыли, имеющей те же поляризационные свойства, что и лунная поверхность. Конечно, не очевидно, что вулканическая пыль — единственный материал, обладающий такими свойствами; еще до начала космических исследований аналогичные наземные наблюдения показали, что, вероятно, грунт Луны в мелком масштабе неровный.

Поляризационные измерения показали, что даже на сравнительно ровных склонах зерна лунного материала

прилипают к поверхности «под действием сил, более значительных, чем сила веса». Впрочем, оптические (в инфракрасной области) и радиоизмерения показали, что лунные материалы очень плохо проводят тепло. В качестве характеристики распространения тепла принимают коэффициент $\gamma = (\varkappa\rho C)^{1/2}$ ($\varkappa$ — теплопроводность, ρ — плотность, C — удельная теплоемкость материала). Измерения дают для Луны $\gamma = 1000$. Но для земных тяжелых скальных пород $\gamma \approx 20$; для пористых пород (или лавы) $\gamma \approx 100$; для раздробленных материалов (порошок) $\gamma \approx 200$; чтобы получить в лаборатории величины порядка 1000, необходимо провести измерения этого коэффициента для очень мелкого порошка, помещенного в вакуум.

Очевидно, что все эти результаты, полученные еще до проведения космических исследований, не подтверждают распространенного предположения, что лунный покров состоит из пыли. Мы все же должны определить, что значит слово «пыль». На Земле этим словом обозначают не только мелкоизмельченный материал, но также и то его свойство, что он ведет себя почти как жидкость. Пыль течет так же, как песок из полного товарного вагона; ее поверхность — так же, как и жидкости, находящейся в равновесии, — плоская и ровная. Эти свойства у пыли объясняются тем, что в пылинках и на их поверхности находится воздух, который вместе с воздухом, содержащимся между пылинками, «смазывает» частицы, и они легко скользят относительно друг друга.

В вакууме, напротив, пыль не может иметь свойств жидкости. В отсутствие воздуха частицы слипаются; более того, если пыль находится в вакууме очень долго, из нее выделяются газы, содержащиеся внутри самих частиц. Поэтому пылевые частицы твердого материала примыкают непосредственно к соседним частицам или к нижележащей поверхности, «склеиваясь» в единое целое. Контактные силы (так называемые силы ван дер Ваальса) зависят от взаимного расстояния частиц, возведенного в седьмую степень. Поскольку это расстояние порядка размеров атомов, контактные силы более значительны, чем гравитационные силы, вследствие чего

частицы материала и соединяются в одно целое; другими словами, пылевые частицы склеиваются друг с другом, образуя легкий, твердый, неоднородный материал, легко выветривающийся и с очень низкой теплопроводностью.

Последние свойства, очевидно, зависят и от состава пыли. Следует отметить, что рыхлость, плохая теплопроводность поверхностного покрова и т. д. были установлены еще до проведения прямых исследований Луны благодаря наземным телескопическим измерениям и привлечению физических и химических соображений.

Как же все-таки объяснить различия между темными и светлыми областями Луны, если состав ее почвы везде один и тот же? При изучении рельефа выяснилось, что светлые области — более молодые. Это означает, что они систематически разрушались вследствие уноса материала, вызываемого не только метеоритными «потоками», с одной стороны, и внутренними нелокальными силами — с другой, но также, вероятно, и электростатическими силами. Светлые районы рельефа под действием эрозии лишены в настоящее время поверхностного покрова. Темные области долин и равнин покрыты более старыми материалами, часть которых, по-видимому, попала из других областей (но только с поверхности этих областей). Возникновение этих различных свойств станет понятным, если учесть (как показывают лабораторные исследования), что при бомбардировке протонами, входящими в состав солнечного корпускулярного излучения, поверхность скальных пород заметно темнеет.

Г. Космические эксперименты и природа лунной поверхности

Подтвердили космические эксперименты только что изложенные представления или опровергли их? Фотографии лунного покрова, сделанные непосредственно с поверхности Луны советскими аппаратами «Луна», первыми осуществившими мягкую посадку на Луну, а также станциями типа «Сервейор», выявили крупнозернистую структуру породы (в масштабе нескольких сантиметров) лунного грунта (рис. 32). Серия снимков,

полученных на «Сервейоре», на которых изображен совок в момент копания, показала, что грунт имеет малую связность; ряд снимков, сделанных с «Лунар Орбитера», выявил необычные детали: было зафиксировано скатывание огромного камня (5 м в поперечнике) по одному из лунных склонов.

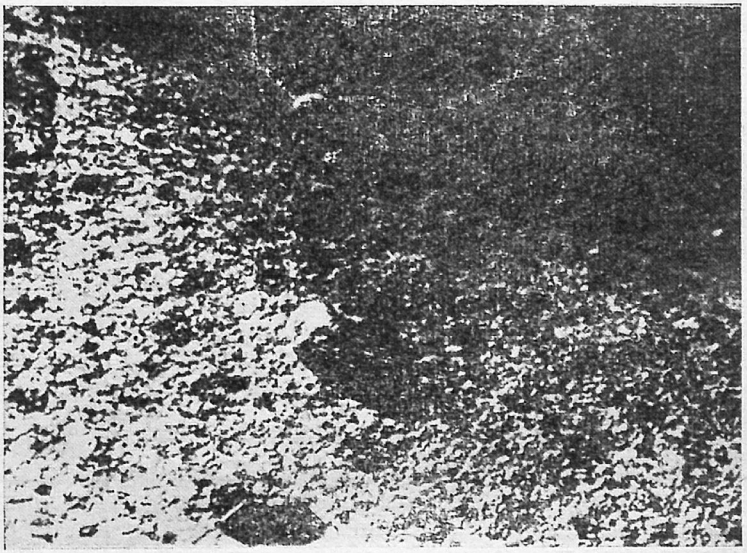


Рис. 32. Структура лунного грунта, сфотографированного с расстояния нескольких десятков сантиметров (снимок передан «Луной-9» 4 февраля 1966 г.).

Отметим, что снимки, сделанные на «Рейнджере-7», уже выявили наличие небольших камней неправильной формы; в частности, один из них, расположенный точно в центре кратера, является, очевидно, осколком скалы, образовавшей этот кратер. Согласно Койперу, наиболее правдоподобное объяснение наблюдений, проведенных на «Рейнджерах» (в основном, над морями), должно опираться на гипотезу «карстовой» структуры рельефа, образовавшейся вследствие температурных явлений

внутреннего происхождения; в этом случае слой крупной пыли, покрывающей моря, был бы очень тонким.

При помощи космических аппаратов были получены данные не только о строении поверхности Луны. Подтвердилось также отсутствие атмосферы (плотность ее менее $1/10^6$ плотности земной атмосферы); было установлено, кроме того, что Луна не имеет заметного магнитного поля (ее магнитный момент — меньше 1/10 000 магнитного момента Земли).

Итак, мы видим, что наши знания о лунной поверхности развиваются путем их последовательного корректирования. Эксперименты, проведенные на «Сервейорах», дали первое представление о составе; позднее были определены многие геологические и петрографические свойства. Несомненно, космические аппараты в настоящее время являются наиболее эффективным инструментом пополнения наших знаний о Луне. Однако пока эти эксперименты не противоречат прежним знаниям, лишь дополняя их различными деталями и часто неопровержимо подтверждая концепции, развитые на основе наземных телескопических наблюдений.

Д. Будущее исследований Луны

Как нам действовать в будущем? Какие вопросы следует пытаться решить с помощью космических аппаратов? Прежде всего необходимо определить химический состав лунного грунта, хотя бы используя рассеяние α-частиц от радиоактивного источника. Этот эксперимент уже был действительно проведен, и анализ данных показал, что по химическому составу лунный грунт похож на базальтовые породы. Был разработан метод для определения присутствия воды путем исследования водяных паров, выделившихся из держащих воду минералов при ударах небольших тел, сбрасываемых с аппаратов типа «Рейнджер». При этом можно было бы получить также сведения о сейсмологической активности и химическом составе атмосферы, какой бы разреженной она ни была.

Однако эти исследования останутся весьма ограниченными до тех пор, пока человек не примет в них непосредственного участия. Первое прилунение пилоти-

руемого космического аппарата «Аполлон-11» состоялось 20 июля 1969 г. Непосредственно предшествующие этому событию эксперименты имели, в основном, целью подготовку этого полета: со спутников Луны «Лунар Орбитер» было проведено подробное картографирование и точное топографическое исследование лунной поверхности. Кроме того, проводились совершенно необходимые измерения лунного гравитационного поля, исследование плотности потоков атомов и ионов в окололунном пространстве, а также космических частиц и метеоритов всех размеров.

В последующем эксперименты приведут к созданию на Луне стационарных и передвижных лабораторий. Помимо решений чисто лунных проблем, в этих лабораториях можно было бы проводить наблюдения, аналогичные тем, которые ведутся в земных обсерваториях. (Эти вопросы рассматриваются в другой книге автора Les observatoires spatiaux.) Слабое притяжение и отсутствие атмосферы, безусловно, облегчат создание крупных инструментов и благодаря этим обсерваториям — автоматическим или управляемым человеком — астрономия и астрофизика получат возможность быстрого развития. Однако есть вопрос, на который пока трудно ответить: смогут ли эти станции устойчиво существовать под действием толчков, вызванных усилением сейсмической активности или ударами массивных метеоритов о лунную поверхность?

Ясно, речь идет не о том, чтобы совершать подобные подвиги просто ради элегантности самого поступка или красоты фотоснимков. Цель астрономов, принимающих участие в организации космических экспериментов, совершенно иная. Она состоит в том, чтобы методически искать решения проблем, связанных с проблемами во всех наших прежних знаниях. В этой области, как и в любой другой области астрономии, методы космических исследований являются великолепным дополнением методов классической астрономии, а не их победоносным соперником.

Свежий пример подтверждает то, о чем я здесь говорил. Когда я читал корректуру этой книги, стали известны новые данные. В частности, исследование Луны

со спутников выявило заметные неоднородности: под *морями* сосредоточены сверхплотные массы — так называемые «масконы»; возможно, что это — гигантские метеориты, внедрившиеся глубоко в Луну. Это открытие должно привести нас к пересмотру некоторых прежних положений в астрономии, в частности касающихся так называемого «эфемеридного времени», определение которого тесно связано с астрономическими наблюдениями движения Луны.

2. Исследование Марса

Известно, что у Марса очень разреженная атмосфера. Измеренные температуры примерно того же порядка, что и на Земле. Спектроскопия показывает, что в атмосфере много двуокиси углерода (CO_2), мало кислорода (O_2) и водяного пара; имеются следы других газов (N_2O). Поверхность Марса, цвет и поляризация которой были подробно исследованы, несомненно, очень запыленная и, возможно, состоит из материалов, сходных с лимонитом ($2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$). Белые полярные шапки, содержащие мелкие частицы инея, увеличиваются зимой и уменьшаются летом.

Удивительны изменения цвета: темно-зеленые области марсианской осенью становятся желтоватыми, что дало основания предположить существование на Марсе растительности (таллофиты, бриофиты, водоросли).

Исследования с помощью космических аппаратов сравнительно немного изменили представления, построенные на основе телескопических наблюдений.

Однако они позволили установить новые важные факты (см. табл. 2, стр. 153): у Марса очень низкая напряженность магнитного поля, его поверхность испещрена кратерами, похожими по виду и размерам на лунные; эти сведения очень важны. Почти полное отсутствие магнитного поля (магнитный момент Марса составляет менее 1/3000 магнитного момента Земли), несомненно, оказывает влияние на условия жизни на Марсе, подверженного интенсивной бомбардировке космическими частицами. Этот факт нуждается в объяснении в рамках теории происхождения солнечной системы.

Наличие кратеров подтверждает метеоритное происхождение этих образований: отсутствие или незначительная

Рис. 33. Вид марсианского кратера с высоты 10 000 км над поверхностью Марса (снимок «Маринера-4», 14 июля 1965 г.). Поперечник кратера (~200 км) сравним с размерами лунных кратеров. На этой фотографии видны также несколько небольших кратеров.

плотность атмосферы и эрозии являются общими для Марса и Луны. Оказывается, Марс — большая Луна!

Подождем более полных исследований: данные о возможности жизни на Марсе будут, несомненно, одними из самых важных.

3. Исследование Венеры

Полет нескольких космических аппаратов в окрестности Венеры, а также достижение ее поверхности советскими космическими аппаратами позволили уточнить ряд характеристик Венеры.

Конечно, уже было известно, что облачная атмосфера состоит в основном из CO_2. Однако, кроме этого, были проведены высокоточные измерения температуры и магнитного поля. Оказалось, что дипольный момент магнитного поля в 10—30 раз меньше дипольного момента Земли. По распределению температуры Венера похожа на «теплицу». Ее температура изменяется от 92° в основании облачного слоя до 260° у поверхности (отдельные измерения дают еще большее значение: 426° у поверхности). Таким образом, бесполезно пытаться обнаружить воду в жидком состоянии: все океаны, испарившись, по-видимому перешли в облака... Однако эти данные лишь предварительные и едва ли можно пока сказать значительно больше: 10 ближайших лет будут десятилетием исследований этой планеты (если позволят бюджеты!), и мы многое узнаем о топографии, грунте и атмосфере Венеры, скрытой от наших телескопов за облаками. И вновь мы должны терпеливо работать, ждать и наблюдать.

4. Метеоритные частицы и пыль

Исследование метеоритов и межпланетной пыли, а также элементарных частиц: протонов, нейтронов, мезонов..., окружающих Землю, находится на верном пути. Что касается дальнейших исследований... то пока еще рано посвящать этому целый раздел, и мы пришли к мнению обсудить этот вопрос в общем разделе. Но подождем несколько лет; тогда, несомненно, мы сможем на основе этих исследований приблизиться к точным знаниям о происхождении наших планет, солнечной системы и взаимодействии этой солнечной системы с межзвездной средой Галактики.

ГЛАВА VI

МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ОБИТАЕМЫХ МИРОВ

1. С Фонтенелем и его Маркизой

Мы не собираемся углубляться ни в художественную литературу, ни в научную фантастику, ни в научные предположения. Однако вправе ли мы полностью пренебрегать тем, что уже написано?

Нет сомнений, что человек всегда думал о живых существах, помимо тех, которые ему знакомы, обитающих как в бесконечно малом, так и в неисследованном мире бесконечности. Космические грезы в изобилии встречаются в литературе. Иногда они служили предлогом для изложения философии в забавной форме: в «Микромегасе» Вольтер знакомит читателя со своими воззрениями на примере Сириуса; Сирано де Бержерак и Свифт также что-либо доказывали... В конечном счете, их селениты и лапутяне — те же земные люди, но только в маскарадных костюмах.

Фонтенель подошел к этой проблеме более серьезно. В его прекрасных беседах («Множественность обитаемых миров») с милой Маркизой ясно доказывается, что жизнь не может иметь повсюду одинаковый характер. Позволю себе привести несколько цитат.

Не следует ли предположить существование селенитов?

«Вот почему я считаю, что на Луне существуют жители. Положим, что никогда не было сообщения между Парижем и Сент-Дени и что будто бы нашелся такой житель в Париже, который никогда не выезжал из своего города; он, стоя на башне Нотр-Дам, видит издали Сент-Дени, и если его спросят, верит ли он, что в Сент-Дени также есть жители, как и в Париже, он смело будет утверждать, что нет. Ибо, скажет он, жителей Парижа я вижу, но жителей Сент-Дени я ни разу не

видел и даже никогда о них не слыхал. Пусть кто-нибудь станет говорить ему, что с башни Нотр-Дам в самом деле нельзя увидеть жителей Сент-Дени вследствие отдаленности, но что все видимое в Сент-Дени очень сходно с Парижем; что в Сент-Дени видны колокольни, дома, стены и что потому он может иметь сходство с Парижем и в том, что он обитаем. Все это, конечно, не произведет никакого впечатления на нашего парижанина; он будет упорно твердить свое, что Сент-Дени необитаем, ибо он в нем никого не видит. Луна есть Сент-Дени, а каждый из нас — житель Парижа, никогда не покидавший своего города».

«Ах! — прервала Маркиза, — вы слишком несправедливы к нам; мы не настолько глупы, как ваш житель, который, видя, что Сент-Дени во всем похож на Париж, безрассудно не верит, что в нем есть также жители; но Луна совсем не похожа на Землю».

«Погодите, сударыня, — ответил я, — если окажется, что Луна совершенно похожа на Землю, тогда вы уже будете вынуждены поневоле считать ее обитаемой».

«Признаюсь, что полное сходство между ними лишит меня способов избавиться от этого мнения; а ваш доверительный вид начинает страшить меня».

Исполнимся, как и Маркиза, доверия и, подобно Фонтенелю, отправимся на Луну вначале с ученым, а потом с Ариосто:

«Одно место там называется Коперник, другое Архимед, третье Галилей; есть Озеро Сновидений, Море Нектара, Море Дождей, Море Кризисов; короче говоря, описание Луны настолько подробно, что если бы ученому довелось быть на ней, то для него столь же трудно было бы потерять дорогу, как для меня в Париже».

«Однако, — прервала Маркиза, — я желала бы знать еще подробности о Луне».

«Этого желания не могут удовлетворить господа наблюдатели; об этом нужно спросить Астольфа, который много путешествовал по Луне под руководством св. Иоанна. Я говорю теперь о приятнейшем мечтании Ариосто, и я уверен, что вам будет приятно узнать о нем...

...История эта такова. Ролан, племянник Карломана, сошел с ума оттого, что прекрасная Анжелика предпочла ему Медора. Однажды храбрый рыцарь Астольф был в земном раю, находящемся на вершине высокой горы, куда занес его крылатый конь. Там он встретился со св. Иоанном, который предложил ему для излечения Ролана от сумасшествия отправиться вместе с ним на Луну. Поскольку Астольфу было любопытно увидеть неизвестную ему страну, он не заставил долго себя упрашивать. Немедленно появилась огненная колесница и унесла по воздуху апостола и рыцаря. Астольф, не будучи философом, очень удивился, найдя, что Луна гораздо больше по сравнению с тем, какой она кажется с Земли, и еще более изумился, увидев там цветы, реки, озера, горы, города, леса и, что поразительнее всего, нимф, охотившихся в этих лесах. Но самое примечательное то, что он нашел на Луне долину, где можно было найти все утраченное на Земле, какого бы рода оно ни было».

Жители? Следовательно, воздух! Но какой воздух? «Я уже и тому очень рада, что вы наделили жителями Луну и окружили ее особым воздухом, без которого любая планета мне казалась бы чересчур обнаженной».

«Это различие двух воздухов препятствует взаимному сообщению двух планет; а если бы речь шла только о перелете, то, как я вам вчера говорил, откуда знать, что когда-нибудь мы не будем способны очень хорошо летать? Хотя, я должен признаться, что это мне кажется маловероятным. Огромное расстояние между Луной и Землей всегда останется важным затруднением. Но даже если бы его не было, т. е. если бы планеты были близки друг к другу, то и тогда было бы невозможно перейти из одного воздуха в другой. Вода есть воздух рыб, и они никогда не переходят в тот воздух, где живут птицы, так же как и птицы не переходят в воздух рыб; им, конечно, мешает не расстояние; воздух, которым они дышат, служит им темницей, из которой они не могут выйти. Мы считаем, что наш воздух смешан с более густыми и грубыми парами, чем лунный. А поэтому, если бы лунный житель и достиг пределов нашей

атмосферы, то, конечно, утонул бы в ней и мертвым упал к нам на Землю».

Кто же обитает в этом воздухе?

«Конечно, ничего похожего на человека мы бы там не нашли».

«Какого же рода жители могли бы быть там?» — нетерпеливо спросила маркиза.

«По совести сказать, сударыня, я этого не знаю. Если бы мы обладали разумом, не будучи, однако, людьми, и жили бы на Луне, могли бы мы тогда вообразить, что здесь на Земле есть странный род животных, именуемый человеческим родом? Могли бы мы представить себе особей, имеющих столь безрассудные страсти и столь мудрые суждения; короткую жизнь и дальновидные помыслы; величайшую осведомленность в вещах, почти бесполезных, и грубое невежество в наиболее важных; удивительное рвение к свободе и чрезвычайную склонность к рабству; сильнейшее желание быть счастливым и полную неспособность достичь этого. Лунные жители должны обладать очень острым умом, чтобы все это понять. Мы постоянно видим самих себя, а до сих пор не можем постичь, каким образом мы сотворены? Многие утверждали, будто боги, опьяненные нектаром, сотворили людей, и что, придя потом в трезвое состояние, они не могли удержаться от смеха, увидев свое творение».

«Стало быть, мы в совершенной безопасности со стороны лунных жителей, — сказала Маркиза, — им, наверное, никогда не удастся отгадать, что мы существуем; но, несмотря на это, я бы желала иметь возможность узнать их. Надо признаться, что меня чрезвычайно беспокоит, почему, наблюдая Луну, я не могу вообразить, даже представить себе, какие там жители?»

«Но почему, — ответил я, — вы не тревожитесь о жителях пространного Южного материка, который нам совсем еще неизвестен? И они, и мы плывем на одном корабле, но они занимают носовую часть корабля, а мы сидим на корме. Вы видите, что между кормою и носом нет никакого сообщения, и, следовательно, на одном конце корабля не знают, какие жители находятся на другом и что они делают. Каким же образом вы хотели

бы узнать, что происходит на Луне, т. е. на другом корабле, плывущем в небесах так далеко от нас?»

Разумеется, трудно представить... Но что мы можем сказать, например, о пчелах? Об этих очень странных существах, живущих рядом с нами?

«...Затем я познакомил ее с Естественной историей пчел, о которых она знала только понаслышке. Вы видите, — сказал я, — даже просто помещая на другие планеты те существа, что живут на нашей планете, мы получаем представления, которые, возможно, кажутся необычными, но тем не менее вполне отвечают реальности; мы бы вообразили их бесконечное количество: и, сударыня, вы должны ясно представить, что История насекомых полна ими».

«В это мне нетрудно поверить, — ответила она. — Взять, например, шелкопрядов, которых я знаю лучше, чем пчел, они дали бы нам весьма удивительных людей, претерпевающих метаморфозы и, таким образом, полностью изменяющихся, ползая одну часть жизни и проводя в полете другую. Можно было добавить сотню тысяч иных чудес о характерах и привычках всех этих неведомых жителей. Мое воображение направлено именно в ту сторону, куда вы указали, и я даже могу разобрать их лица. Я не могу их вам описать, но все же я что-то вижу».

«Что касается этих лиц, то я советую вам, сударыня, предоставить их сновидениям нынешней ночи. И завтра мы узнаем, будете ли вы им обязаны за представление вереницы лиц жителей разных планет».

Во всяком случае, это не абсурд; в области, с которой мы начинаем знакомиться, позволено строить много гипотез, и притом различных. То, что истинно по одну сторону Пиренеев, может быть ложным по другую. Сказанное справедливо также и для Урала и Великой Стены:

«Я рассказал вам, — ответил я, — все новости о Небесах, какие только были известны, и не знаю, есть ли более полные и новые известия. Мне очень жаль, что они не так удивительны и не так чудесны, как некоторые наблюдения, о которых я читал недавно в китайских летописях, переведенных на латинский язык. Там

описывается тысяча звезд, падающих внезапно с большим шумом в море или разрушающихся и падающих в виде дождя. И такие явления наблюдались в Китае неоднократно. Я нашел записи о них в двух достаточно далеких друг от друга эпохах, не считая описания звезды, с грохотом взрывающейся где-то на западе. Жаль только, что это чудное зрелище предоставлено одному Китаю и что в здешних странах никогда не видели ничего подобного. Совсем недавно все наши философы, считая свое мнение основанным на опыте, изо всей мочи утверждали, что небеса и небесные тела суть нерушимы и неизменны, а в тоже самое время люди, живущие на другом конце Земли, видели тысячи разрушающихся звезд. Какая разница!»

«Однако, — оказал она, — китайцев считают великими астрономами».

«Правда, — ответил я, — но...»

Оставим Фонтенеля с его Маркизой и немного буйным воображением. Наши современники далеко не так последовательно обдумывают свои высказывания. Они часто проявляют тенденцию к фантазированию, а не к логическому размышлению. Уэллс описал марсиан, которые хотя и менее миролюбивы, но столь же маловероятны, как и вольтеровские жители Сириуса, а Черное Облако Хойла представляет лишь блестящую и забавную затею для высмеивания наших правительств.

Мы не будем говорить здесь о лавинах летающих тарелок, о марсианах, высаживающихся на Землю, если верить прессе (в том числе и «заслуживающей доверия»), целыми легионами, которые остаются всегда невидимыми для большинства людей и для всех ученых...

Конечно, может показаться, что эту проблему не следует рассматривать в книге, предмет которой — «экспериментальная астрономия». Однако нам бы не хотелось слишком сильно ограничивать определение «космических исследований». Поскольку возможность сообщения с внеземными мирами зависит, во-первых, от астронавтики и, во-вторых, от радиоастрономии, мы будем считать, что проблема внеземной жизни находится в рамках этой книги.

Однако сразу же придется сознаться, что о жизни во вселенной известно очень мало. Мы быстро разберем по пунктам то, что нам известно и так же быстро познакомимся с нашими надеждами на приобретение новых знаний в этой области. Несомненно, мы должны условиться о встрече в конце века. В 1999 г. мы, безусловно будем знать значительно больше. Но вернемся к тому, что нам ближе.

2. Жизнь и биосфера

Есть ли жизнь на других планетах солнечной системы или на их спутниках? Разумеется, сам факт, что мы — люди и живем на Земле, вносит элемент антропоморфического субъективизма в те методы, посредством которых мы пытаемся обнаружить и, возможно, обнаружим жизнь вне Земли. Мы можем допустить, что формы жизни могут быть совершенно отличными от земной (у нас биохимическую основу составляет углерод). Однако разве нельзя допустить, что этой основой может быть, например, фосфор? Несомненно, следует ожидать, что первые виды жизни, которые мы откроем, будут похожи на известные нам земные формы; что касается других видов, то, вероятнее всего, мы столкнемся с большими трудностями при опознании в них форм жизни! Сможем ли мы это сделать, наблюдая их движение? Кристаллизация и турбулентность — распространенные формы движения в физической химии. Воспроизведение? Для установления деления простейших потребуется много времени. Питание, дыхание? Все это очень неопределенно, и, по-видимому, переход от самых примитивных форм жизни к наиболее высокоорганизованным живым существам включает множество этапов все возрастающей сложности. Какой же будет жизнь в новых физико-химических условиях? Задав такой вопрос, мы в настоящее время лишь можем (и даже должны) ограничиваться антропоморфическими методами поисков внеземной жизни, т. е. искать жизнь, похожую на земную.

Однако приняв раз и навсегда это вызывающее сожаление, но совершенно необходимое ограничение, как

же мы будем исследовать жизнь, похожую на нашу? Где мы можем скорее всего обнаружить такую жизнь?

Даже на Земле нелегко определить те условия, при которых может существовать жизнь. Несомненно, мы не можем связывать исследования условий, необходимых для «появления» жизни, с изучением жизни, существующей ныне во вселенной. Дело в том, что история небесных тел так богата и так плохо известна нам, что, вероятно, были, существуют или возникнут в будущем миллионы небесных тел, находящихся при таких условиях, в которых возможно появление жизни, — даже если эти условия очень жестки. Ведь и на Земле жизнь может развиваться при условиях, которые существуют не на всем земном шаре, но которые, тем не менее, достаточно широки. Используя термин, введенный Ламарком, мы будем называть область, где эти условия имеют место, *биосферой*.

Эта область вокруг Земли простирается до высоты примерно 10 000 м; бактерии и споры, лишенные хлорофилла, а также птицы, были замечены на высоте 8000 м; отдельные виды пауков были обнаружены на Эвересте на высоте 7000 м. Океан также входит в биосферу. Под материками жизнь проникает до глубины 1—2 км; существуют бактерии в подземных водах, в нефти... Некоторые виды зеленых растений встречаются на высоте свыше 6000 м на Эвересте; морские водоросли растут до глубины 300 м ниже уровня моря. Более того, эти границы определяются главным образом наличием питательных веществ в органическом материале растительного происхождения. Согласно Вернадскому, биосфера — это область, где вода может существовать в жидком состоянии и возможны различные фазовые переходы (состояния: жидкое — твердое, твердое — газообразное, газообразное — жидкое), где лучистая энергия (за исключением коротковолнового излучения, губительного для жизни) поглощается не вполне прозрачным материалом. Последнее очень важно, поскольку зеленые растения играют роль посредника в процессе преобразования лучистой энергии Солнца в химическую энергию различных молекул. Одной из фундаментальных реакций фотосинтеза является ассимиляция хлорофил-

лом, заключающаяся в основном в образовании углеводов из углекислого газа и воды. Эту реакцию можно записать так:

$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2.$$

Разумеется, в действительности цепь реакций гораздо сложнее и состоит из нескольких промежуточных этапов, так что, безусловно, глюкоза не является первичным продуктом.

Очевидно, определенные выше условия не допускают существования жизни одновременно в большей части вселенной. В самом деле, где еще есть условия, близкие к тем, которые имеются в биосфере? Прежде всего следует исключить звезды: у них настолько высокая температура, что все вещества могут существовать только в газообразном состоянии; даже простейшие молекулы (например, двухатомные) обнаружены только на очень холодных звездах.

Межпланетное вещество, достаточно удаленное от звезд, также должно быть исключено — по крайней мере в настоящее время. Поле излучения здесь слишком слабо для того, чтобы поддерживать реакции фотосинтеза. Кроме того, межпланетное вещество (вопреки предположениям Аррениуса) должно быть также исключено из-за присутствия там коротковолнового излучения, губительно действующего на любые формы жизни. Лишь при исключительных обстоятельствах жизнь в межпланетной среде может появиться во время какой-либо достаточно быстрой миграции, но нам не следует ожидать встречи с подобной жизнью при обычном ходе эволюции. Таким образом, только на близко расположенных к звездам объектах могут выполняться сформулированные выше условия; такими телами являются *планеты.*

Мы можем быть уверены в одном: планетные системы — обычное явление во вселенной. Девять больших планет и тысячи малых обращаются вокруг Солнца. Еще много лет назад ван де Камп показал, что не менее трети звезд, подобных Солнцу, почти наверняка окружены системами планет.

Прежде чем перейти к рассмотрению вопроса о возможности жизни на других планетах и позиции астрономии в этом вопросе, рассмотрим, как обстоят дела на планетах нашей собственной солнечной системы.

3. Солнечная система

Здесь мы снова должны начать с исключения: слишком малые тела не могут удерживать атмосферу; это справедливо для Луны и астероидов. Следовательно, ассимиляция при помощи хлорофилла здесь вряд ли имеет место; однако можно ли исключить существование анаэробных организмов? Поскольку на Земле жизнь существует в нефти и в подпочвенных водах, не существует ли она в лунных скалах? Однако в настоящее время мы должны считать, что вероятность жизни в таких условиях крайне мала *.

Большие планеты? Несомненно, Меркурий, как и Луна, не имеет атмосферы. Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун, вероятно, слишком холодные. Плутон еще более холодный. Остаются Земля (разумеется!..), Венера и Марс.

Пока мы еще не можем много сказать о Венере. В табл. 3 (стр. 159) приведены предположительный химический состав и температура ее атмосферы: здесь нет ничего, что заставило бы нас заранее полностью исключить возможность жизни на Венере. Однако это все, что нам известно в настоящее время.

Давайте подождем!

Можно лишь сослаться на одно мнение — Сагана. Он пришел к заключению, что, поскольку на Венере высокая температура, ее поверхность должна напоминать пустыню: осадки не могут достичь поверхности и вся вода планеты сосредоточена на большой высоте в облаках. Этот аргумент приводит к выводу, что на Венере жизнь маловероятна. Однако пока он остается чисто умозрительным.

---

* Исследование образцов лунных пород, доставленных на Землю, подтвердило, что на Луне отсутствуют какие-либо формы жизни. — *Прим. ред.*

Остается лишь одна планета, внешняя по отношению к орбите Земли, где как будто можно предположить наличие жизни. Возникла даже «астробиология», связанная с изучением проблемы жизни на Марсе и основанная советским астрономом Г. А. Тиховым. Что же можно сказать о Марсе?

Существуют не слишком много астрофизических методов изучения Марса. Поскольку его видимый угловой диаметр изменяется от 4 до 26″ (в лучшем случае), ряд деталей его поверхности можно наблюдать визуально. Окраска и внешний вид меняются от места к месту и с течением времени. Можно получить довольно приличные спектры деталей, можно также измерить поляризацию и рассеяние излучения для различных длин волн и углов падения солнечных лучей, освещающих марсианскую атмосферу.

Изучение марсианской атмосферы в первую очередь показало, что она очень разреженная, бедна кислородом, но богата углекислым газом. Водяной пар также присутствует, но в очень малых количествах; новое, полученное в последнее время подтверждение состоит в обнаружении четко выраженных кратеров, свидетельствующих об отсутствии заметной эрозии.

Сравним столбцы табл. 3 для Марса и Земли. Из этого сравнения вытекает, что любая форма жизни на Марсе не может быть очень похожей на земную. Большой интерес представляют установки, называемые «фитотронами», в которых можно воспроизвести условия марсианской атмосферы (низкое давление, высокое содержание углекислого газа, низкую влажность, поглощение синих лучей), так или иначе имеющих отношение к возникновению жизни. Эксперименты подтвердили, что на Марсе могли бы выжить и развиваться мхи, лишайники и некоторые бактерии. Однако необходимо отметить ограниченность такого эксперимента: какие из представленных здесь организмов могут существовать на марсианских скалах, какие — в грунтовых водах и подземных газах? Кроме того, в этом эксперименте учитываются лишь некоторые параметры, которые, возможно, могут оказаться существенными только для земных организмов. Но только ли эти параметры важны? Не могут

ли возникнуть совершенно особые формы жизни при наличии, например, сильного магнитного поля? Однако при правильном учете различий условий для Марса и Земли подобные установки могут принести много пользы для изучения жизни как на Земле, так и на Марсе.

Какие же данные в настоящее время дают нам прямые наблюдения Марса?

Прежде всего, упомянем марсианские каналы, которые якобы наблюдали Скиапарелли и Ловелл; но мы немедленно поместим их в мешок, наполненный волшебными сказками.

В действительности при наблюдении Марса в телескоп можно различить белые полярные шапки и темные пятна переменных размеров, выделяющиеся на фоне светлой желто-оранжевой поверхности. Внешний вид этих деталей весьма изменчив; сравнивая их изменения с сезонными изменениями земной растительности, можно предположить существование обильной растительности. Уже в 1927 г. Шлиппер считал, что темную сине-зеленую окраску этим областям, возможно, придают марсианские растения.

Эти сезонные изменения можно описать, как и на Земле, рассматривая два полушария, находящихся в разных фазах при полуобращении планеты. Напомним, что наклонение плоскости экватора Марса к плоскости его орбиты равно 24° (сравните с 23°27′ для Земли), а период его обращения вокруг Солнца равен 687 суткам (365 для Земли). Следовательно, эволюцию внешнего вида поверхности Марса можно представить так: в начале весны светлые пятна, расположенные вблизи полюсов, становятся более отчетливыми. Контрастность их возрастает, а полярные шапки значительно уменьшаются и отступают (по-видимому, вследствие нагрева и испарения), обнажая отдельные очень светлые области, которые, вероятно, являются элементами рельефа Марса. Волна изменений идет от полярных шапок: темные области на низких широтах становятся еще темнее только к концу весны, после того как это явление начинает ослабевать на высоких широтах. Зимой «темные» пятна становятся очень бледными, особенно перед тем, как над ними пройдет волна потемнения, идущая от полюса к

экватору. Возможно, причиной этих изменений цвета являются вариации влажности, вызванные меридиональной циркуляцией. Но следует отметить, что уже в 1930 г. Антониади наблюдал темные пятна, окраска которых изменялась от коричневой к красной во время марсианской осени, удивительно похожей на земную осень.

Эти сезонные изменения трудно наблюдать; они очень сложны по характеру и частично маскируются другими переменными явлениями. Как мы знаем, в марсианской атмосфере часто появляются белые облака (пыль, туман, состоящий, возможно, из кристаллов льда); она пронизана сильными потоками пыли (ветры с «марсианских пустынь», желто-оранжевая окраска которых, возможно, вызвана наличием окислов железа), а иногда покрыта синей «дымкой» (утренние туманы, состоящие из капель воды, возможно, аналогичные ночным светящимся облакам на Земле). Кроме того, на поверхности Марса происходят нерегулярные явления, изменяющие от года к году вид некоторых районов Марса. Иногда такие изменения продолжаются несколько лет.

Поляризационные измерения дали нам дополнительную информацию о природе этих изменений марсианской поверхности.

Поляризация зависит от фазового угла и очень сильно — от рассеивающих свойств среды, в данном случае — поверхности Марса. При наблюдениях измеряется степень поляризации

$$p = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = f(V),$$

где I_1 и I_2 — амплитуды интенсивности (электрического вектора) в «картинной» плоскости (рис. 34) и вдоль оси, перпендикулярной этой плоскости. Заметим, что связь p и V мало зависит от других параметров (хотя, вообще говоря, следует также учитывать положение нормали к рассеивающей поверхности относительно картинной плоскости).

Для Марса значение угла V заключено в пределах от 0 до 45°; на рис. 35 поляризация представлена в виде функции от V. Эти измерения, впервые предложенные

Лио в 1922 г., были проведены Дольфюсом в 1948—1956 гг. Следуя Дольфюсу, мы представили графики результатов измерений поляризации оранжевых областей (марсианские пустыни вблизи центра диска), темных областей и полярных шапок отдельно. Для того чтобы можно было оценить степень «индивидуальности» каждой кривой, на этом же рисунке приведены аналогичные

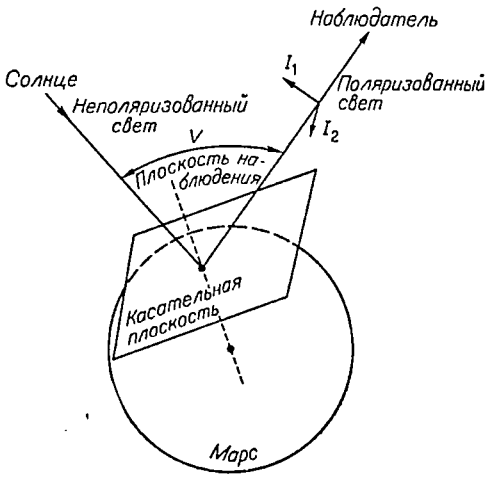


Рис. 34. Поляризация солнечных лучей вследствие их рассеяния в атмосфере планеты.

кривые для Луны и Венеры, а на рис. 36 и 37 даны графики результатов измерений тех же параметров для различных земных материалов.

Следует отметить, что сезонные изменения на планете сопровождаются значительными вариациями поляризации.

Разумеется, марсианские облака создают дополнительную поляризацию, которую не всегда легко исключить. Однако, когда это удается сделать, как нам интерпретировать данные измерений параметров поляризации?

Относительно желтых пустынь ответ ясен. Соответствующие кривые очень хорошо совпадают с кривыми для лимонита; марсианские пустыни, вероятно, состоят

из лимонита (или из очень похожего минерала) в распыленном состоянии.

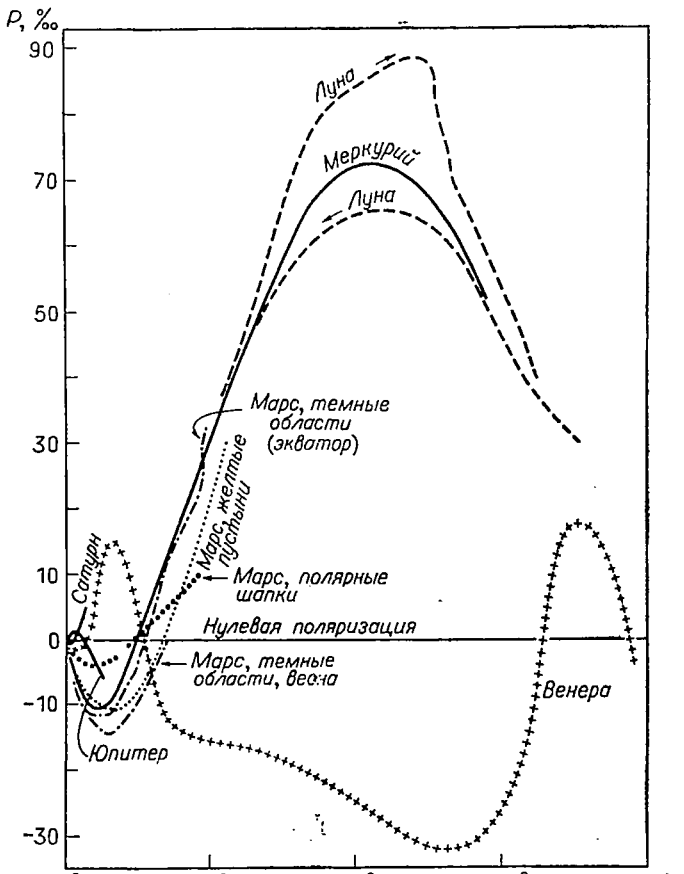


Рис. 35. Поляризация атмосферой или поверхностью планет и Луны. По оси абсцисс отсчитывается угол V, определенный на рис. 34. По оси ординат — относительная величина поляризованной части света в тысячных долях.

В отношении полярных районов лабораторные исследования показывают, что удовлетворительное объяснение состоит в том, что покров этих областей, напоминающий

иней, образован мелкими кристаллами льда. Этот иней, по-видимому, испаряется под действием солнечных лучей.

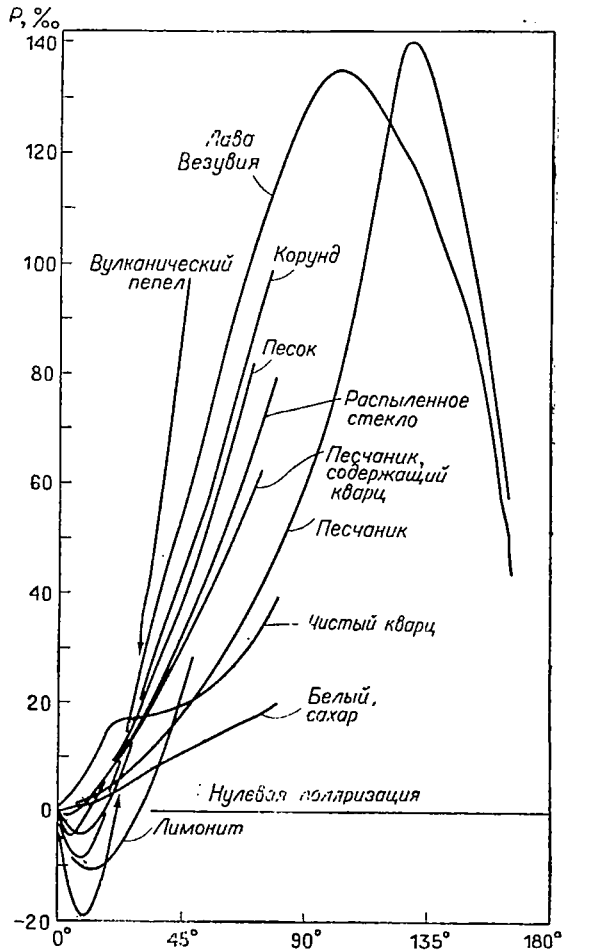


Рис. 36. Поляризация различными твердыми телами (искусственные грунты). Обозначения те же, что и на рис. 35.

Однако проблема темных районов совсем не так проста! Земные минералы не дают ничего похожего. Изучение многих цветковых растений и тайнобрачных

лишайников также привело к отрицательным выводам. Возможно, микрокриптогамы имеют свойства, близкие к свойствам темных марсианских областей. Дольфюс утверждает, что окраска отдельных видов этих микроорганизмов претерпевает изменения, похожие на изменения

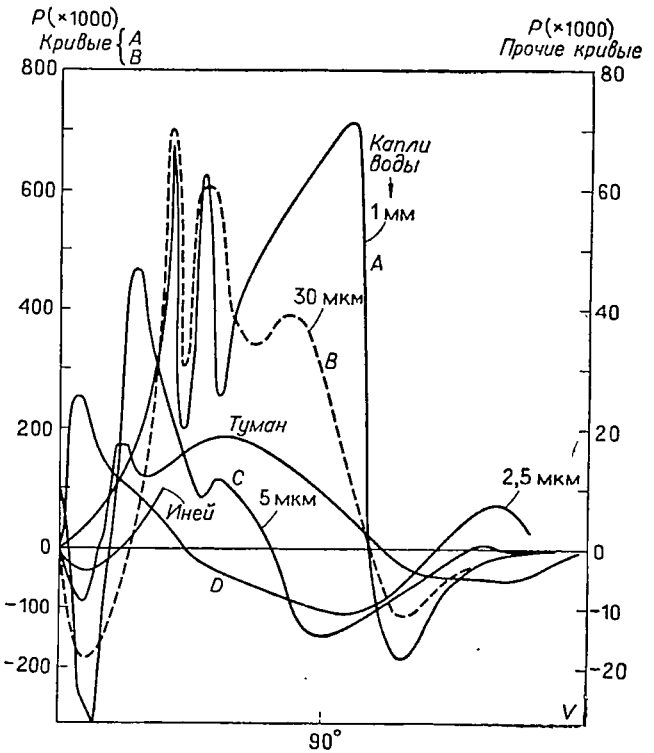


Рис. 37. Поляризация различными туманами, частицами воды различных размеров, инеем. Обозначения те же, что и на рис. 35.

марсианской поверхности: одна из разновидностей одноклеточных водорослей (Nivallis) произрастает в высокогорных областях и окрашивает снег в красный цвет. Некоторые хромогенные бактерии, например сине-фиолетовые Bacillus pyocyaneus, дают очень заметную окраску. Эти предварительные сравнения наводят на

глубокие размышления: в настоящее время они являются основными доводами (хотя, как мы видим, к ним не следует относиться слишком уверенно) существования жизни вне Земли.

Другой и достаточно серьезный аргумент вытекает из спектральных данных.

Еще много лет назад Шлиппер показал, что в спектре отражения темных областей Марса нет характерной линии хлорофилла; это было подтверждено В. В. Шароновым и Койпером. Однако Г. А. Тихов показал, что в условиях сурового и очень сухого климата спектр отражения хлорофилла может значительно ослабеть. Недавно Синтону удалось получить инфракрасный спектр темных областей планеты. В спектре поглощения темных областей обнаружены три молекулярные полосы на длинах волн 3,43, 3,56 и 3,67 мкм. Первые две характерны для многих сложных молекул, содержащих радикал CH_2,— как органического, так и неорганического происхождения. Но третья, по-видимому, соответствует углеводородам. Но связано ли ее возникновение с наличием растительной жизни? *

В заключение этого раздела уместно процитировать Гарольда Юри:

«Ни одного предположения не было сделано о какой-либо неорганической субстанции, вероятно существующей на безводных и безжизненных планетах, которой определялись бы наблюдаемые цвета [то же самое можно сказать и о поляризации. — *Пекер*] и их сезонные изменения».

В другом месте Юри показывает, насколько фундаментальным является этот вопрос, и хотя мы не имеем пока определенного ответа, вполне вероятным кажется ответ: «Жизнь!» Положительное доказательство существования на Марсе жизни в какой-либо форме, зависящей от замечательных химических свойств соединений углерода, дало бы нам одно из самых значительных открытий в истории науки.

---

* Скептицизм Пекера оказался оправданным. Более детальное исследование показало, что обнаруженные Синтоном полосы вызываются поглощением молекул HDO в земной атмосфере. — *Прим. ред.*

Кроме Марса (и, конечно, Земли), по-видимому, преждевременно искать жизнь где-либо еще в солнечной системе. Однако нам хотелось бы сослаться на дискуссию, вызванную подробным физико-химическим исследованием образцов крупных метеоритов, в частности метеорита Оргей, упавшего 14 мая 1864 г., который в настоящее время вновь изучается несколькими исследовательскими группами. К сожалению, пресса (определенная ее часть!) серьезно искажает значение и роль этих исследований. Некоторые ученые (в частности, Клаус и Наги) утверждают, что в этих метеоритах они обнаружили органические вещества (которые не являются достаточным признаком жизни, но, несомненно, делают предположение о ней весьма правдоподобным). Вместе с тем, другие специалисты (Андерс, Дефландр) считают, что обнаруженные в метеоритах частицы органического состава являются следствием загрязнения этих осколков уже на Земле, что делает неверными полученные в результате эксперимента выводы. Без новых систематических исследований, по-видимому, нельзя сделать определенных заключений *).

4. Другие планетные системы во вселенной

В настоящее время мы можем произвести прямой химический анализ метеоритов и исследовать излучение главных планет солнечной системы, но располагаем лишь весьма незначительной информацией относительно других планетных систем. Пока мы не можем даже выделить излучение планеты, в десятки раз большей нашего Юпитера, на фоне излучения, испускаемого

* Более подробные исследования, проведенные, в частности, в Советском Союзе, подтвердили наличие в метеоритах определенного типа — так называемых углистых хондритах (к которым относится и метеорит Оргей) — сложных органических соединений, в том числе углеводородов, аминокислот и даже некоторого аналога знаменитой «двойной спирали» ДНК. Однако свойства всех этих соединений (в частности, их оптическая неактивность) свидетельствуют, что они скорее всего имеют неорганическое происхождение. [Подробнее см. сборник «Возникновение органического вещества в солнечной системе», «Мир», 1969, а также *А. П. Виноградов, Г. Воробьев*, Аналог полинуклеотида в метеоритах, Докл. АН СССР, 209 (1972). — *Ред.*]

звездой — это относится и к самым близким к нашему Солнцу звездам; если бы расстояние этой планеты было в десять раз больше расстояния Юпитера от Солнца, то и тогда такие планетные системы было бы совершенно невозможно наблюдать непосредственно.

Однако можно попытаться определить массу планеты, поскольку из-за ее тяготения центр масс системы звезда + планета смещается относительно центра звезды. Следовательно, можно обнаружить движение звезды вокруг этого барицентра, а определив параметры наблюдаемого движения по орбите относительно неподвижных (далеких) звезд, можно вычислить суммарную массу возмущающих планет.

Сделаем несложный расчет. Рассмотрим звезду E типа Солнца с массой M и радиусом R, расположенную на расстоянии $D = 1$ парсек от Солнца, вокруг которой на расстоянии 10 а. е. движется планета с массой $m = M/50$ и радиусом $r = R/10$ (т. е. значительно более плотная, чем средняя звезда). Что мы могли бы наблюдать?

III закон Кеплера позволяет определить период обращения в системе из равенства

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(M+m)}{4\pi^2}, \tag{1}$$

откуда

$$T = \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{G(M+m)}} \approx \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{GM}}. \tag{2}$$

Подставляя вместо входящих в это равенство величин их численные значения, найдем $T = 3{,}8 \cdot 10^8$ с ≈ 10 лет.

При $a = 1$ а. е. период был бы равен 5 месяцам. Эти легко наблюдаемые периоды сравнимы по величине не только с периодами планет нашей солнечной системы, но и с периодами обычных визуально-двойных звезд.

Нетрудно вычислить расстояние между звездой и барицентром. Имеем

$$Md = m(a - d), \tag{3}$$

откуда

$$d = a\frac{m}{M+m} = \frac{1}{50}a. \tag{4}$$

Соответствующее расстояние равно

$$\delta = \frac{d}{D} = \frac{1}{50}\frac{a}{D} \approx \frac{a}{50}, \qquad (5)$$

где a выражается в астрономических единицах, а δ — в угловых секундах. Следовательно,

$$\delta \approx 0{,}200'' \quad \text{при} \quad a = 10 \text{ а. е.},$$
$$\delta \approx 0{,}020'' \quad \text{при} \quad a = 1 \text{ а. е.}$$

Угловое расстояние такого порядка вполне можно измерить на хороших астрометрических фотографиях. Основные трудности связаны с тем, что рассеяние лучей света от звезды приводит к появлению на фотопластинке изображения размером в несколько микрон в диаметре, которое в лучшем случае соответствует 1″, а не 0,01″. Следовательно, необходимо очень тщательно определить положение «центра масс» темного пятна на пластинке, являющегося изображением звезды. Эта процедура имеет смысл только тогда, когда пятно по форме близко к кругу. Однако это бывает не всегда (и даже не часто). Для разработки методики проведения таких измерений с высокой точностью ван де Кампу потребовались годы напряженного труда. Наиболее подходящие инструменты для таких измерений — это астрометрические рефлекторы; один из них был недавно установлен во Флагстаффе (США).

Можно проверить, что даже такие огромные планеты нельзя обнаружить непосредственно; предположим, что альбедо такой планеты равно единице (т. е. ее поверхность является идеальным отражателем — наиболее предпочтительный для ее обнаружения случай). Из всего потока F излучения звезды на планету попадает лишь его часть, равная $^1/_4\,(r/a)^2$ (рис. 38), которая излучается в нашу сторону половиной видимого диска планеты. До нас доходит определенная часть этого отраженного света, и точно такая же часть излучения приходит к нам непосредственно от самой звезды. Следовательно, различие между звездными величинами планеты и звезды будет порядка

$$\Delta m = 2{,}5 \lg\left(\frac{1}{4}\frac{r^2}{a^2}\right) \approx 23 \text{ зв. вел.}, \qquad (6)$$

если $a = 10$ а. е., и 18 зв. вел., если $a = 1$ а. е.

Это слишком большое различие (в рассматриваемом нами случае звезда имеет 7-ю звездную величину) не позволяет обнаружить планету. В наших двух примерах угловое расстояние между планетой и звездой равна 10″ ($a = 10$ а. е) или 1″ ($a = 1$ а. е.). Таким образом, переналожения изображений звезды и планеты можно не

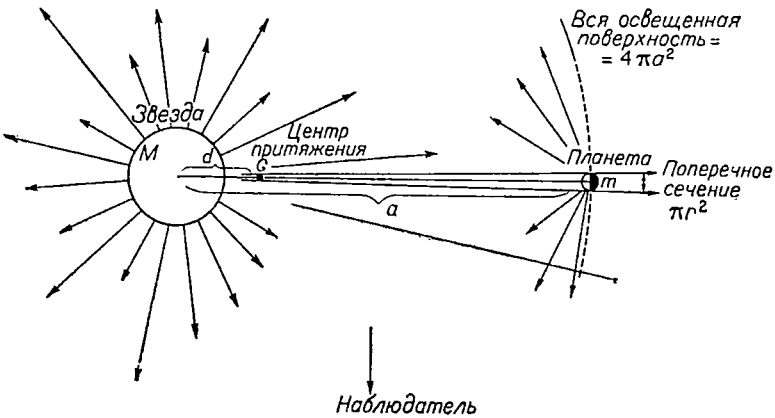


Рис. 38. Видимость планеты, обращающейся вокруг звезды.

опасаться; но планета слишком слаба! Нетрудно убедиться, что эта проблема значительно труднее, чем проблема обнаружения самых слабых спутников планет солнечной системы.

Тем не менее ван де Камп в 1948 г. объявил, что ему, по-видимому, удалось обнаружить несколько планетных систем; в табл. 4 (стр. 169) приведены основные характеристики этих систем, а также нескольких звезд, которые начали изучать с того времени.

После 1948 г. этому вопросу было посвящено лишь небольшое число опубликованных работ. В действительности это — нормальное явление, поскольку ход работы определяется периодами обращения планет вокруг звезд: чтобы заметить какое-либо возмущение, даже близкие звезды необходимо наблюдать годами. И эта трудность усиливается с ростом расстояния до звезды. Если при-

нять предел обнаружимости орбитального движения равным примерно 0,002″, получим

$$\delta = \frac{1}{50}\frac{a}{D} = 0{,}002'' \approx 10^{-8} \text{ рад}, \qquad (7)$$

что на пределе обнаружимости дает соотношение между a и D:

$$a = 5 \cdot 10^{-7} D. \qquad (8)$$

Это очень близко к соотношению между числами в 3-м и 5-м столбцах табл. 4. Расхождение возникает вследствие неопределенности масс планет!

Остается еще одна проблема. Ясно, что не может быть и речи об измерении яркости планеты отдельно от звезды. Однако массы таких планет очень велики: они примерно в 10 раз превосходят массу Юпитера. Возможно ли существование планет в таких условиях?

Известно, что многие двойные системы, составляющие которых находятся на большом удалении друг от друга, состоят из «обычной» звезды и белого карлика. Белые карлики обладают особыми свойствами: если плотность ядра обычных звезд зависит от температуры, то плотность ядра белых карликов (и, несомненно, планет) зависит от давления, поскольку их вещество находится в особом «вырожденном» состоянии. Этот факт стал известен еще 30 лет назад благодаря работам Рессела и Котари.

Если мы попытаемся продвинуться от осколка камня к белому карлику, увеличивая массу, то увидим, что сначала плотность остается постоянной, а радиус возрастает пропорционально кубическому корню из массы. В таких больших телах, какими являются планеты, под действием давления происходят изменения кристаллической структуры вещества. Возрастание массы до величины того же порядка, что и масса Юпитера, приведет вследствие глубоких изменений физических свойств к уменьшению радиуса. Совпадает ли кривая зависимости масса — радиус (рис. 39) с аналогичной кривой для белых карликов? Вычисления Де Маркуса для чисто водородных масс, представленные на рис. 39, указывают, что это действительно так.

Следовательно, необходимо определение массы, если мы хотим установить различие между звездой и планетой. В настоящее время считается, что светимость звез-

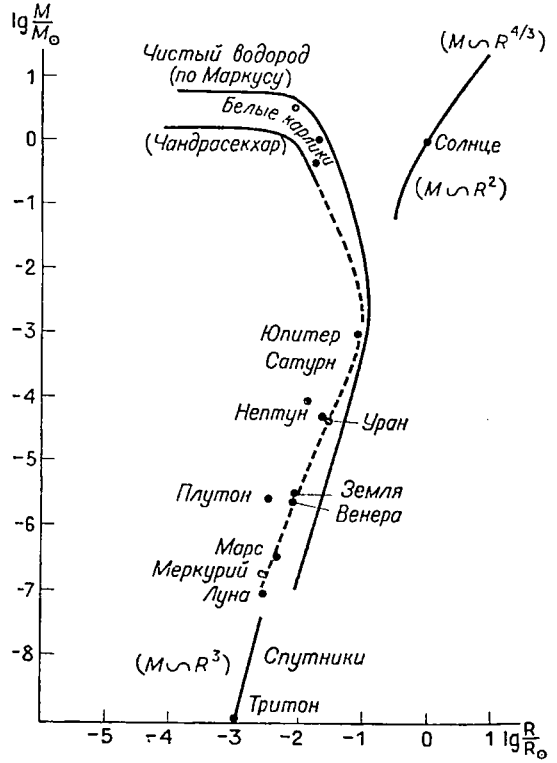


Рис. 39. Связь между массой планет и их радиусом. Сплошные линии соответствуют предсказаниям теории строения звезд и планет; штриховые — наблюдениям планет и спутников.

ды является функцией ее массы согласно весьма общему соотношению

$$\lg L = 3{,}5 \lg M. \qquad (9)$$

Можно ли применить это соотношение к планетам? Для объекта с массой $0{,}05\, M_\odot$ мы бы имели

$$L = 2{,}5 \cdot 10^{-5} L_\odot \qquad (10)$$

и, следовательно,

$$\Delta m = -2{,}5 \lg(2{,}5 \cdot 10^{-5}) = +11{,}5 \text{ зв. вел.}, \qquad (11)$$

что соответствует заметно более высокой светимости, чем вычисленная в предположении об идеальных рассеивающих свойствах планеты. Для вычисления светимости, соответствующей разности блеска, равной 23 зв. вел. (см. выше стр. 131), нам следовало бы оперировать с массами, меньшими $0{,}002\, M_\odot$. Это значение не очень далеко от массы Юпитера! Обсуждение этого вопроса сопряжено с серьезными трудностями: весьма сомнительно, что соотношение между массой и светимостью справедливо; светимость должна быть ниже, чем следует из этого соотношения; в частности, это относится к случаю белых карликов. Сомнительно также, что температура в центре тела с такой малой массой может быть настолько высока, чтобы могли протекать ядерные реакции с выделением тепла. Поэтому наиболее вероятно, что объекты, обнаруженные ван де Кампом, являются планетами; расчеты, проведенные выше, скорее всего несправедливы.

В пользу эмпирического свидетельства существования планетных систем часто приводится другой аргумент. Мы знаем, что система звезда плюс планета имеет определенный момент количества движения. В солнечной системе вследствие удаленности планет и медленного вращения Солнца практически весь (98%) момент количества движения приходится на долю планет.

Из наблюдений известно, что горячие звезды (более горячие, чем звезды спектрального типа F5) вращаются гораздо быстрее. Скорость вращения резко уменьшается при переходе от горячих звезд к более холодным; она практически равна нулю у звезд более холодных, чем звезды класса F5, и, в частности, у Солнца *. Из законов сохранения можно сделать вывод, что момент количества движения системы звезда плюс планета остается постоянным в процессе эволюции системы. Это приводит нас к мысли, что при образовании планет к ним

* Линейная скорость вращения Солнца на экваторе составляет всего 2 км/с; напротив, у горячих звезд не редкость скорости, достигающие 100—200 км/с. — *Прим. ред.*

переходит часть момента количества движения системы, что и приводит к замедлению вращения звезды. Правда, этот аргумент носит довольно косвенный характер; существуют другие теории звездного вращения, в которых, в частности, рассматривается взаимодействие вращения, меридиональной циркуляции и конвекции в звездах — всех явлений, которые не характерны для звезд, более холодных, чем звезды типа F5, но происходят в звездах более горячих. Согласно этим теориям, момент количества движения не передается планетам, а уменьшается при выбросах звездами вещества, сопровождающих мощную активность, аналогичную солнечной.

Но мы согласимся с доводами ван де Кампа в качестве достаточно веского аргумента в пользу существования планет, обращающихся вокруг звезд нашей Галактики.

Если дело обстоит именно так, то нас не может не поразить один факт: в нашей Галактике одна звезда из трех — двойная, а одна из тридцати — белый карлик. Из 39 ближайших звезд 15 образуют двойные системы, и по крайней мере 4 из них (а возможно, и больше) имеют планеты. Такое большое количество планет следует ожидать и по современным космогоническим теориям: согласно им происхождение планет связано с образованием крупных тел из газа и пыли, окружающих звезды; это, разумеется, весьма общее явление... *.

Итак, наша солнечная система не является единственной, а скорее существует в миллионах копий во вселенной. Условия, необходимые для жизни (на двух из девяти главных планет нашей солнечной системы — Земле и Марсе — эти условия, разумеется, имеют место), должны, несомненно, существовать на миллионах планет — типа Земли по крайней мере! Следовательно, множественность обитаемых миров становится уже не безумной идеей... Отсюда следует, что мы согласны с Фонтенелем!

Итак, существование планетных систем весьма вероятно. Однако вероятна ли жизнь на этих планетах?

---

* Более подробные данные о Солнце и солнечной системе приведены в табл. 5 и 6 в конце книги. — *Прим. ред.*

Что можно сказать о разумной, высокоразвитой жизни, подобной земной? При такой постановке вопроса (я к нему вернусь позднее) искомую вероятность определить очень трудно. Например, сравнение времени существования жизни на Земле с возрастом самой Земли едва ли можно считать мерой вероятности существования жизни на планетах. Для начала зададимся вопросом, как долго будет продолжаться на Земле жизнь? Кто знает!.. Более того, даже если бы мы знали, как оценить это время существования жизни, нам вряд ли удалось бы определить основные факторы, так что мы едва ли смогли бы обобщить полученные данные на другие миры!

Однако этот вопрос стоит рассмотреть подробнее. Астроном Су-Шу Хуан считает, что важным параметром, определяющим появление и продолжительность жизни, является количество энергии E, получаемой планетой (на единицу площади и в единицу времени) от своей звезды.

Приняв за единицу количество энергии, получаемое Землей, мы найдем значения для следующих из планет солнечной системы:

Меркурий	6,68	Марс	0,43
Венера	1,91	Юпитер	0,04
Земля	1,00	Сатурн	0,01

Мы можем принять, что жизнь может появиться и развиваться при условии, что E больше 0,1 и меньше 5. Можно рассчитать, в какой области около звезды величина получаемой энергии заключена в этих пределах. Очевидно, чем слабее звезда, тем меньше будет эта зона. Нетрудно определить ее протяженность в относительных единицах. Если D_1 и D_2 — внутренний и внешний диаметры зоны, то

$$\frac{D_1}{D_2} = \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} = \sqrt{\frac{0{,}1}{5}} \approx 0{,}14. \qquad (12)$$

Ясно, что геометрическая протяженность этой «области жизни» для холодных звезд невелика, так что вероятность того, что эти звезды имеют планеты, на которых может развиваться жизнь, несомненно, очень мала.

Однако необходимо учесть еще один момент — время жизни звезды. Для эволюции жизни здесь, на Земле, от ее зарождения до современного уровня потребовались сотни миллионов лет. С другой стороны, эволюция некоторых звезд попросту не дает времени для развития жизни до достаточно высоких форм. Историю жизни звезд можно кратко описать так: сначала идет конденсация и уплотнение холодных облаков пыли и газа. Затем, с ростом давления и температуры в недрах газовой массы начинаются термоядерные реакции, основные из которых — превращение водорода в гелий. Позже, когда запасы водорода практически будут исчерпаны, звезда резко увеличивается в размерах, превращается в гиганта и начинает излучать гораздо больше энергии, чем раньше; жизнь и, возможно, даже планеты, на которых она существует, вероятно, погибнут. Эволюция звезды продолжается, но излучение звезды уже не может поддерживать жизнь. При этом эволюция звезд протекает с разной скоростью. Горячие или с большой массой звезды проходят своей жизненный путь гораздо быстрее: звезды с наибольшей массой завершают его за один — десять миллионов лет, а самые холодные звезды — за десять — сто миллиардов лет. Солнце занимает примерно среднее положение.

Согласно Су-Шу Хуану, существует и третий фактор, который необходимо принимать во внимание. Это проблема устойчивости орбит планет, иными словами, будут ли планеты постоянно пребывать в «зоне возможности жизни» для этих «избранных» планет? Считается, что около половины (а возможно, значительно больше) всех звезд принадлежит к двойным системам или к системам большего порядка. Среди этих звезд только у 1—2% могут быть планеты, на которых возможна жизнь, так как в планетных системах двойных, тройных и т. п. звезд орбиты планет легко могут потерять устойчивость. В целом, возможно, «только» 3—5% всех звезд могут иметь планеты, на которых могла бы поддерживаться жизнь, если пользоваться критерием Су-Шу Хуана. Однако для одной только нашей Галактики это составляет огромное число — несколько миллиардов...

Мы видим, что оценка вероятности того, что на планете — в предположении, что астрономические и астрофизические условия достаточно благоприятны — имеется жизнь, а тем более развитая разумная жизнь, — весьма рискованное предприятие!

Две теоретические школы противостоят друг другу в этом вопросе. Сторонники одной считают, что Земля, скорее, представляет редкое исключение. Другие, напротив, считают, что Земля — самая средняя планета в этом воображаемом обследовании. Разумеется, окончательные выводы сделать весьма нелегко. Можно лишь сказать, что на Земле возникновение жизни в результате физико-химических процессов не могло быть часто повторяющимся событием: земная жизнь существует в весьма определенных формах, а элементарные аминокислоты, которые являются основной компонентой земных живых существ, очень малочисленны. Это свидетельствует в пользу утверждения, что жизнь на Земле — результат редкого и маловероятного сочетания обстоятельств. Противники этой идеи считают ее слишком пессимистичной, приводя в пример Марс (см. выше стр. 117). Однако наличие растительности на Марсе остается под серьезным сомнением, поскольку различные минералы могут также испытывать сезонные изменения окраски при изменении содержания кристаллизационной воды...

Что же следует делать при таких обстоятельствах и к какому мнению примкнуть? Как мы видели, наблюдения и теория находятся в согласии в вопросе о существовании планет. Астрономия указывает, что значительная часть этих планет, *быть может*, обитаема. Однако ни биология, ни астрономия, ни физика не позволяют уверенно оценить вероятность того, что жизнь *действительно* существует. Учитывая эти трудности, с которыми мы в настоящее время сталкиваемся при наблюдениях Марса и Венеры, мы считаем, что попытка обнаружить неразумные формы жизни на других планетах не приведет к успеху. По-видимому, только разумные существа могут найти способ выдержать чрезвычайно долгий межпланетный перелет или каким-либо иным способом обнаружить свое существование.

Именно поэтому были начаты систематические поиски свидетельств существования разумной жизни и сделаны попытки объяснить многие, иначе не объяснимые явления, исходя из предположения о существовании внеземной разумной жизни.

5. Проект Озма

Цель проекта Озма (названного так, по-видимому, в честь чародея из страны Оз, знаменитого предтечи космических полетов, предложившего для этой цели воздушный шар, героя фантастической повести Л. Франка Баума, популярного среди детей вот уже на протяжении полувека) как раз состояла в том, чтобы отыскать возможные сигналы разума во вселенной. Проект появился на свет благодаря энергии Фрэнка Дрейка, осуществившего на практике идею, предложенную незадолго до того Коккони и Моррисоном, а также методы радиоастрономии к наблюдениям гипотетических планет, перечисленных в табл. 2 (стр. 153).

По существу идея очень проста. Если на других планетах есть жизнь, то вероятность того, что она достигла такого же уровня, как и на Земле, очень мала. Между тем научно-технический прогресс, сменяющий на определенной стадии биологическую эволюцию разумных существ происходит очень быстро. Следовательно, если жизнь существует на многих планетах, то, скорее всего, во многих областях вселенной жизнь достигла более высокого развития, чем на Земле — как в биологическом, так и в техническом отношении. Поэтому «инопланетяне» (или по крайней мере часть их) должны владеть методами передачи сообщений на очень большие расстояния; возможно, они догадываются о нашем существовании и могут послать нам мощные радиосигналы, придумать универсальные языки (и способы их использования) и т. д.

Поскольку они разумны, они избрали бы наиболее экономный способ связи — посредством радиоволн. Они выбрали бы такую длину волн, которая была бы достаточно короткая и выделялась на фоне галактических шумов, но вместе с тем была достаточно длинной, чтобы

не поглощаться в атмосфере Земли (рис. 40). Поскольку они знают физику и астрофизику, им известно, что наибольший интерес для радиоастрономов представляет радиоизлучение на волне 21 см, соответствующей линии нейтрального водорода, и они должны предположить, что у нас есть радиотелескопы, настроенные на эту волну: они, возможно, знают, что мы разумные существа, в противном случае они наверняка избегали бы

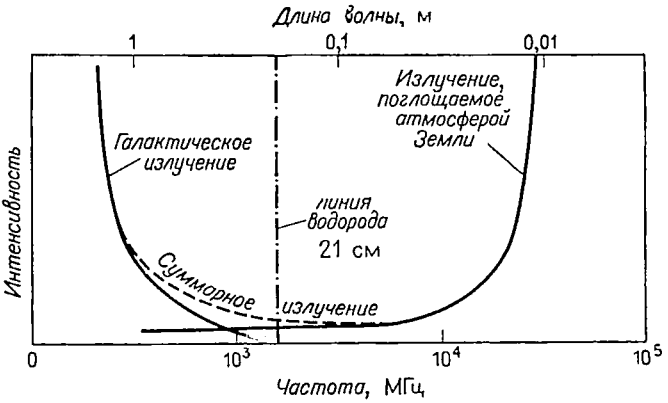


Рис. 40. Выбор длины волны для (гипотетической) межпланетной радиосвязи.

попыток связи с существами настолько примитивными, что им незнакома радиоастрономия. Следовательно, если эти разумные «инопланетяне» существуют и если они желают поддерживать связь с нами, то они пошлют нам сообщение на волне 21 см.

Излученный с планеты отдельный сигнал с интенсивностью, сравнимой с интенсивностью сигнала, который мы сами способны послать с Земли, можно было бы обнаружить на расстоянии до 9 световых лет с помощью радиотелескопа диаметром всего 30 м; в ряде стран существует много телескопов подобных размеров и даже гораздо больших. Кроме того, системы звезд τ Кита и ε Эридана (а также 61 Лебедя, но их излучение скрадывалось бы похожим излучением Млечного Пути) находятся от нас на меньшем расстоянии. Вот почему в

течение нескольких лет радиотелескоп Национальной радиоастрономической обсерватории в Грин Бэнк (США) использовался для наблюдения за этими двумя звездами на волне 21 см. Спустя более полувека старая мечта Чарльза Кро, который хотел установить связь с марсианами с помощью солнечного «зайчика», направленного на пустыни Марса, стала реальностью: мы попытались установить связь с братьями по разуму...

Что мы искали в Грин Бэнк?

Очевидно, внеземные жители не знают ни азбуки Морзе, ни языка эсперанто... Вместе с тем можно считать, что законы логики и математики справедливы везде. Можно также использовать методы телевидения для передачи изображений... На протяжении месяцев радиотелескоп Дрейка искал какой-либо «специальный» периодический сигнал...

В конце концов от этой попытки пришлось отказаться... Некоторые предсказывали отрицательный результат эксперимента с самого начала: они твердо верили в единственность Земли.

Другие, напротив, считали, что инопланетяне, вероятно, уже предприняли подобные попытки несколько веков назад (Вольтер думал об этом, но у него не было радиотелескопа) или даже до сих пор предпочитают другие средства сообщения, например космические корабли, которые время от времени прилетают в солнечную систему; было предложено провести поиски таких внеземных аппаратов на самой Земле. Можно также рассмотреть вопрос об обнаружении инфракрасного излучения соседних планетных систем (тех, которые охватываются проектом Озма), поскольку такое исследование могло бы привести к выявлению каких-либо признаков органических соединений, как это предполагалось в отношении Марса. Следует подчеркнуть, что эта органическая материя, даже живая, не обязательно была бы разумной жизнью.

К этому стоит добавить следующее. Логично считать, что разумные существа, находящиеся примерно на такой же ступени развития, что и человек, могли бы за-

интересоваться проблемой связи с нами, но маловероятно, что цивилизации, находящиеся на более высоком уровне, начали бы с нами переговоры. Ведь мы сами делаем очень мало попыток «установить контакт» с пчелами или устрицами.

Таким образом, вероятность, что более высокоразвитые цивилизации будут заинтересованы в общении с жителями Земли, по-видимому, очень низка, а это еще значительней уменьшает вероятность того, что мы в ближайшем будущем получим бесспорное доказательство существования внеземной разумной жизни.

6. Невероятное, вероятное, возможное и бессмысленное

Как и следовало ожидать, те исследования, с которыми мы познакомились и которые, как можно судить по работам Хуана, Дрейка, Мак-Гоуэна и многих других, достаточно серьезны, вызвали к жизни немало менее серьезных предположений...

Например, была высказана гипотеза (принадлежащая советскому астрофизику И. С. Шкловскому), что Фобос, спутник Марса, — полое (и, следовательно, искусственное?) тело... 30 июня 1908 г. в Западной Сибири произошел взрыв, настолько мощный, что некоторые отказываются приписать его причину упавшему метеориту (быть может, это был взрыв внеземного звездолета?). Существует источник радиоизлучения CTA 102, который испускает переменный и, возможно, периодический сигнал (следовательно, передаваемый внеземным разумом?). Даже спектры сверхновых звезд, исчезнувшие цивилизации, «очевидное» доказательство, что ники владели ядерной энергией... и многое многое другое используются как аргументы в пользу существования внеземного разума. Список вторжений инопланетян постоянно пополняется...

Я никак не хочу осмеивать эту тематику. Конечно, мы должны пользоваться гипотезами. Разве они не являются необходимым условием для творческих поисков? Однако необходимы определенная научная точность и известная логическая строгость, тем более когда имеют

дело с таким сложным предметом. Гипотезы вызывают контргипотезы; приходится оценить вероятности без решающих экспериментов и при отсутствии бесспорного доказательства.

Фобос? Попытался ли кто-либо из журналистов, ставших пылкими пропагандистами искусственного происхождения Фобоса, познакомиться подробнее с орбитой Фобоса и ее возмущениями с точки зрения небесной механики? Сибирь? Столкновение кометы с Землей гораздо более вероятное и более правдоподобное событие, чем трагическое окончание визита инопланетян. CTA 102? В природе существуют все виды колебаний яркости (например, пульсирующие звезды типа «цефенд»), и их объяснение чисто физическое: фактически само существование строго периодических колебаний исключало бы вмешательство разума! Но следует добавить, что даже наличие этих флуктуаций в излучении CTA 102 отвергается большинством радиоастрономов. Почему мы должны волноваться об остальных?

Однако мы должны говорить об этом, поскольку это очень существенно для осуждения эксплуатации человеческого любопытства в чисто коммерческих целях. Эта эксплуатация опасна. Она вносит соблазн смешивать возможное и невозможное, вероятное и невероятное, правду и ложь. Все «возможно» и поэтому все может существовать! Пуанкаре сказал об этом примерно так: «Я играю в карты с человеком, который выбрасывает короля двенадцать раз подряд. Какова вероятность, что он — профессиональный шулер?». Что касается так называемых наблюдений за летающими тарелками, то мне кажется, что вероятность психопатологических реакций или индивидуальной или коллективной истерии (ее первое время не было!) значительно выше, чем вероятность визита инопланетян; кроме того, известно, что те, кто страдает умственным расстройством, едва ли осознают свою болезнь. К тому же, это вопрос не просто болезненности, но также и гиперчувствительности, влияющей на интерпретацию изображения, которое получается на сетчатке глаза, и т. д. Наконец, я позволю себе добавить, что существование вполне разумных фантазеров, спекулирующих на тарелках, является фактом, вероятностью

которого пренебрегать никак нельзя. Эти выдумщики относятся к той же разновидности людей, как и те, которые спекулируют на способах излечения рака.

Рассматривая трудную проблему (некоторым нравится называть ее «тайной»), подобную проблеме сверхновых звезд, мы должны прежде всего внимательно изучить ее с точки зрения физики. Если мы не найдем решения, мы можем начать искать его в другом месте. Однако из того факта, что спектры сверхновых еще не имеют полного объяснения, не вытекает, что они — порождение разума. Логика должна применяться везде, и «гипотеза» о разуме носит в данном случае явно спекулятивный характер. Не лучше ли удовлетворить любопытство публики, приводя в пример настоящие научные методы (и проект Озма — неплохой пример), а не игнорировать логику и преподносить самые сенсационные и хуже всего обоснованные выводы в качестве наиболее правдоподобных, не определять (как это однажды было сделано одним из известных защитников летающих тарелок) истину как приятное для нас качество, не поднимать фантазирование на уровень науки и не сводить науку к магии?

Я надеюсь, что меня простят за мое мстительное преследование менял, которые вызывают беспорядок в наших головах! Позвольте мне теперь перейти к короткому заключению.

Планеты? Только в одной нашей Галактике их, несомненно, существует миллионы.

Жизнь на этих планетах? На сотнях из них она, по-видимому, возможна; это не означает, что она там существует. Но было бы глупо говорить, что ее нет.

Разумная жизнь на этих планетах? Ее еще не обнаружили; она не невозможна; однако весьма маловероятно, что для высокоразвитых инопланетян Земля выглядит достойной перелетов, требующих по меньшей мере нескольких лет (если только Земля не является исключительной планетой, но это предположение мы отбросили), и также маловероятно, что нам удастся в ближайшее время установить с ними связь. Опять-таки было бы глупо говорить, что это невозможно. Но в конечном счете низкая вероятность равносильна невозможности.

Если бы обезьянам в зоопарке дали пишущие машинки (пример принадлежит Эмилю Борелю) и у них внезапно возникло бы желание печатать без остановки, то могли бы они напечатать точные копии книг, хранящихся в Национальной библиотеке? Это невозможно. Так как вероятность настолько мала, что никто ни на мгновение не подумал бы, что эта возможность может однажды превратиться в реальность. Мы можем сказать то же самое о многих «и даже в том случае, если?..» которые задаются нам о внеземных жителях ходом технического прогресса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПОСЛЕ ДЕСЯТИ ЛЕТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В наше время, спустя более 10 лет после запуска первого искусственного спутника Земли и 20 лет с момента первого использования ракет в качестве внеземных обсерваторий, невольно напрашивается вопрос, в какой степени космические исследования приведут к устареванию гигантских установок, огромных обсерваторий или радиообсерваторий, построенных на Земле.

Несомненно, что космические исследования (и в частности их политические, стратегические и даже экономические аспекты) уже привели к поразительной эволюции положения астрономии. Эта наука, казалось бы, наглядный пример не представляющих практического интереса исследований и в то же время прибежище ученых-одиночек (или даже маньяков), за последние десятки лет, наполненных все более тесными контактами с физиками и их методами исследований (коллективная работа, применение современной и ультрасовременной техники), затем впала в грех контактов с космическими исследованиями. Астрономия познакомилась с секретностью — вследствие причастности к военным задачам; она стала гигантской — поскольку это необходимо для рискованных космических предприятий; к ней предъявляются требования большей эффективности и все большей скорости (должен сказать, что все эти тенденции меня чаще беспокоят, чем успокаивают)...

Эти тенденции проникли и в международные организации. Все, кто работает в быстро развивающейся области космических исследований, начинают посматривать на работающих в области классической астрономии с некоторым презрением или по крайней мере со снисходительностью — на этих наблюдателей, которые ищут

в телескопы нечто неведомое, и на этих теоретиков, незнакомых с последними математическими новинками.

В нашем веке еще лет 20 назад спектроскописты и радиоастрономы куда больше зависели от уровня развития техники, чем представители классической астрономии, и занимались по существу методами, а не объектами исследования. Они стремились не смотреть в сторону астрономии и забыть о существовании своих коллег. Теперь, когда они решили первые технические проблемы, у них появилось время заняться самим объектом своих исследований: они изучают материальную вселенную. Методы, которые они придумали, стали их рабами, а не повелителями, как было раньше. И часто неожиданное сочетание старых дисциплин с новой техникой приводит к плодотворным открытиям. Представление эволюции звезд с помощью диаграмм Герцшпрунга — Рессела, предложенное много лет назад и сделанное в последнее время открытие квазаров, являются убедительными примерами этого творческого содружества.

Я убежден, что космическая астрономия будет развиваться по тому же пути — по пути последовательной интеграции. Используя космическую технику, астрономы, достойные так называться, получат (а это и теперь уже случается часто!) информацию, которая только тогда приобретет полную ценность, когда она соединится с данными наземной астрономии. С другой стороны, гонка, связанная с развитием космической техники, скорее всего лишь слегка коснется астрономов — и это ни в коей мере не несет им ущерба.

Подлинной проблемой, которая встанет перед семейством астрономов, будет проблема выбора. Ясно, что уже в текущем столетии будет создана обсерватория на Луне (или на орбите, или где-нибудь в другой месте) и она будет мощнее и лучше — со всех точек зрения, — чем наземные обсерватории. Однако, я уверен, было бы неправильно считать, что эта внеземная обсерватория при всех ее достоинствах сможет полностью заменить наземные обсерватории. В конце концов жизнь там будет весьма нелегкой и далекой от комфорта. Люди должны будут постоянно находиться в очень ограничен-

ных объемах, а их пребывание будет не слишком длительно хотя бы вследствие психологической потребности возвратиться в более привычное окружение. Затраты энергии для переброски людей туда и обратно и для проведения опытов и ухода за оборудованием приведет к значительному удорожанию этих операций. Разумеется, высокая степень автоматизации позволит дистанционно программировать наблюдения и производить анализ полученных данных. Но большие затраты неизбежно приведут к тому, что некоторые наблюдения и измерения на внеземных станциях окажутся весьма неэкономичными.

В этом, несомненно, кроется основная причина, в силу которой мы будем вынуждены сохранить наши прежние обсерватории и пользоваться ими. Фактически эта причина действует уже сейчас: во Франции мы продолжаем использовать Медон и Ниццу, а не более предпочтительный с точки зрения условий наблюдений Пик-дю-Миди, даже если на нем имеются все удобства и он оснащен высококачественными приборами ... и это было бы правильным, даже если бы указанные приборы были еще лучше!

Существует и другая причина сохранения в строю традиционных приборов. Они являются превосходным стендом для испытания новой техники, они также прекрасно служат для обучения молодых астрономов. Вполне вероятно, что сохранится необходимость их использования для вспомогательных целей.

Что предпримет астроном 2068 г., которому предстоит исследовать конкретный объект? То же, что астроном 1968 г. или астроном 1868 г.: он попытается «оптимизировать» задачу. Он будет стремиться делать то, что можно сделать без чрезмерных затрат; он согласится платить за экспедицию в горы ... или пользование орбитальной станцией только в том случае, если это покажется необходимым. А такой случай будет, по-видимому, нечастым! Уже в настоящее время астрономы иногда поглядывают на финансовые затраты на космическую технику с некоторой сдержанностью. Должен сохраняться разумный баланс затрат, и на первом месте среди астрономических исследований не обязательно

будет исследование космоса: еще раз повторим, что вслед за нынешней фазой разработки и совершенствования технических средств последует эра объединения методов исследования и решения проблем «оптимизации» исследований. Появятся миллионы астрономов, как это можно предсказать с помощью экстраполяции на 2068 г. (весьма рискованной), данных о численности специалистов за время с 1920 г. по 1966 г. На 1000 человек будет приходиться один астроном, т. е. в 100 раз больше по сравнению с тем, что имеется сейчас во Франции.

Однако нет сомнений, что новые, космические методы на некоторых участках продвинули далеко вперед границы астрономических исследований. Поскольку освоение этой области будет продолжаться и дальше, возникает естественный вопрос, какие же основные идеи выдаст астрономия, скажем, в ближайшие сто лет?

Астрономия — наука с древней историей. Первой ее фазой, продолжавшейся от античности до середины XIX в., была фаза перечисления и описания, которую я назову «энтомологической» фазой. Следует помнить, что это перечисление всегда неполное, а описание ближайших участков вселенной уточняется с каждым днем.

Во второй фазе, начало которой можно, пожалуй, считать с открытия солнечной активности и сверхновых звезд (т. е. примерно со времен Тихо Браге и Галилея), мы начали знакомство с эволюцией звезд и эволюцией вселенной. Кроме того, в это же время возникли проблемы «астрометафизики», связанные с фундаментом всей физики. Эта фаза исследований аналогична изучению эволюции видов биологами; она имеет свои особые области — свою эмбриологию, тератологию, физиологию ... и она также постоянно развивается.

Основной чертой будущих исследований — третьей фазы — будет появление на сцене биологии, тесно связанной с астрономией — «биоастрономия». Эта новая отрасль, которой предстоит развиваться в наиболее важном направлении, явится естественным продолжением подробного изучения планет и даже их использования в целях, которые не будут иметь ничего общего с астрономией.

Однако рост мощности ракет, возможность выведения на орбиты или к другим планетам все более тяжелых аппаратов, рост автоматизации и точности приборов позволят нам исследовать вселенную все глубже и в пространстве, и во времени. Так, например, понижение минимального значения регистрируемой яркости объекта соответствует увеличению доступных для наблюдений расстояний: изучение же наиболее удаленных галактик должно помочь нам решить проблему расширения вселенной; измерения огромной энергии, излучаемой квазарами и вообще астрономия высоких энергий (например, γ-лучей) приведут нас к пониманию самых важных проблем эволюции материи во вселенной; что же касается более близких к нам объектов, то изучение коротковолнового излучения Солнца (рентгеновское излучение) подведет нас к раскрытию тайны—простите, проблемы—солнечной активности, что в свою очередь вернет нас к биоастрономии и проблеме происхождения жизни. Разумеется, такой прогресс подразумевает, что наряду с ростом мощности космической аппаратуры будут параллельно развиваться земные методы и, в частности, будет расти отряд астрономов и вычислителей.

Изучение полного спектра излучения небесных тел (особенно в области коротких волн), прямые исследования Луны и планет (и, следовательно, попытка познания биофизической эволюции материи вселенной) — все это явится научными достижениями исключительной важности. У нас нет другого метода, кроме астрометрии, кроме спектроскопии, кроме радиоастрономии. Позвольте мне выразить надежду, что это новое детище человеческого честолюбия не станет джином, вырвавшимся из бутылки, и что неукротимое стремление к небу войдет в живую ткань солидарности людей на Земле.

Да позволят мне читатели закончить эту главу и книгу предостережением, сделанным Анри Данжоном в приложении к книге «Популярная астрономия», посвященном космическим аппаратам:

«Мы только что применили термин «завоевание»; им обозначается как самое хорошее, так и самое плохое. Человек понесет с собой в небо не только жажду познания и открытий, он не сможет полностью освободиться

от индивидуального или группового самомнения. Для сохранения и безопасности человеческого рода этот новый шаг к власти не должен стать причиной страха для тех, кто стремится жить в мире.

Вслед за энтузиазмом, вызванным первыми успехами, уже появились отклики, свидетельствующие не только о научной заинтересованности. Вот почему на научных конгрессах, посвященных космосу, необходимо все больше внимания уделять тому, как избежать введения каких-то космических привилегий. Земное законодательство применяется в космосе — это уже не звучит как шутка.

...Выразим пожелание, чтобы научная польза освоения космоса шла впереди сознательной или неосознанной его эксплуатации и чтобы мы не говорили слишком много о «завоевании»; некоторые из этих завоеваний могут быть гибельны — ведь покорение ядерной энергии дало не только положительный эффект. В настоящее время все поклонники космоса так или иначе вовлечены в происходящие события; пусть они не забывают о Земле и ее нуждах, когда их взоры обращаются к небу.

Таблица 1 *

Основные спутники, на которых проводились астрономические исследования

Спутник	Дата запуска	Задачи. Результаты
Спутник 1	4 окт. 1957	Первый искусственный спутник Земли
Спутник 2	3 нояб. 1957	Космические и рентген. лучи
«Эксплорер-1»	1 февр. 1958	Космические лучи и открытие внешнего радиационного пояса [1]
«Эксплорер-3»	26 марта 1958	Продолжение программы «Эксплорера-1» и плотность микрометеоритов
Спутник 3	15 мая 1958	Корпускулярное излучение Солнца
«Эксплорер-7»	13 окт. 1959	Солнечное и земное ИК-излучение, излучение в линии Lα, рентген, плотность микрометеоритов
«Транзит-2А» и спутник «НИЛ»	22 июня 1960	Измерения галактических радиошумов, излучения Lα и рентген
«Эхо-1»	12 авг. 1960	Геодезические измерения
Спутник 5	19 авг. 1960	Космические и УФ-лучи
«Дискаверер-17»	12 нояб. 1960	Жесткая радиация во внутреннем поясе
«Эксплорер-11»	27 апр. 1961	γ-лучи
«Эксплорер-12»	16 авг. 1961	Подтверждение существования потоков солнечной плазмы
«Эксплорер-13»	25 авг. 1961	Микрометеориты

* Эта таблица, таблица 2 и рис. 1 составлены Футоли.

[1] Одновременно и независимо от американских исследователей советскими исследователями был открыт внутренний радиационный пояс Земли. — *Прим. ред.*

Продолжение

Спутник	Дата запуска	Задачи. Результаты
«Транзит-4В»	15 нояб. 1961	Определение фигуры Земли. Внутренний радиационный пояс
«OSO-1»	7 марта 1962	Первая «орбитальная солнечная обсерватория»; солнечное излучение, рентген, УФ- и γ-лучи, изучение «микровспышек», не наблюдаемых с Земли
«Космос-1»	16 марта 1962	Космическое и солнечное излучение; микрометеориты
«Ариель-1»	26 апр. 1962	Исследование ионосферы
«Эксплорер-16»	16 дек. 1962	Микрометеориты: 15 000 ударов за 7,5 мес.
«Хич-хайкер-1»	27 июня 1963	Исследования радиационных поясов
«Вела» 1, 2 и «TRS-2»	17 окт. 1963	Измерения γ- и рентген. лучей, потоков нейтронов солнечного и галактического происхождения. Радиационные пояса
«Эксплорер-18»	27 нояб. 1963	Измерения солнечного ветра, открытие областей жесткой радиации вне радиационных поясов
«Эхо-2»	25 янв. 1964	Массивный спутник связи
«Электрон» 1 и 2	30 янв. 1964	Одновременное исследование с двух спутников радиационных поясов
«Ариель-2»	27 марта 1964	Галактические радиошумы, микрометеориты

Продолжение

Спутник	Дата запуска	Задачи. Результаты
«Электрон» 3 и 4	10 июля 1964	Продолжение программы «Электрона» 1 и 2
«Эксплорер-23»	6 нояб. 1964	Обнаружение микрометеоритов
«OSO-2»	3 февр. 1965	Изучение Солнца
«Пегас-1»	16 февр. 1965	Обнаружение метеорных частиц
«Грэб-6»	9 марта 1965	Изучение Солнца
«Пегас-2»	25 мая 1965	Метеорные частицы
«Пегас-3»	30 июля 1965	Метеорные частицы
«Молния-1В»	14 окт. 1965	Первое фотографирование Земли с расстояния 36 000 км
«Геос-А»	6 нояб. 1965	Пять геодезических экспериментов
«ОАО-1»	8 апр. 1966	Первая «орбитальная астрономическая обсерватория»; не выполнила программы из-за выхода из строя батарей
«Пагеос-1»	23 июня 1966	Геодезический спутник, подобный «Эхо», но более медленный (угловая скорость — 5′ в 1 с)
«ATS-1»	7 дек. 1966	Фотографирование Земли с расстояния 36 000 км
«OSO-3»	8 марта 1967	Продолжение программы «OSO» 1 и 2
«OSO-4»	18 окт. 1967	Четвертая орбитальная солнечная обсерватория
«ATS-3»	5 нояб. 1967	Цветные фотографии Земли с расстояния 36 000 км

Продолжение

Спутник	Дата запуска	Задачи. Результаты
«Геос-В»	11 янв. 1968	Продолжение программы «Геоса-А» (сигналы которого прекратились 1 дек. 1966)
«Эксплорер-37»	5 марта 1968	Исследование солнечного излучения
«Космос-215»	18 апр. 1968	Астрономический спутник, оборудованный 8 телескопами (прекратил существование 30 июня 1968)
«ESRO-2B»	17 мая 1968	Изучение солнечного и космического излучения
«Эксплорер-38»	4 июля 1968	Радиоастрономические исследования
«Геос-1»	5 дек. 1968	Изучение солнечного и космического излучения вне магнитосферы
«OAO-2»	7 дек. 1968	До 6 янв. 1969 11 телескопов второй орбитальной астрономической обсерватории проработали в общей сложности 65 ч (фотографирование нескольких сотен объектов, в частности планеты Сатурн)
«OSO-5»	22 янв. 1969	Продолжение программы «OSO-4»
«OSO-6»	9 авг. 1969	Шестая орбитальная солнечная обсерватория

Таблица 2

Космические аппараты и автоматические межпланетные станции

Название	Дата запуска	Задачи. Результаты
«Пионер-1»	11 окт. 1958	Достижение высоты 114 000 км; измерения внутреннего радиационного пояса, плотности микрометеоритов в космическом пространстве и межпланетного магнитного поля
«Пионер-3»	6 дек. 1958	Открытие второго радиационного пояса
«Луна-1»	2 янв. 1959	4 янв. 1959 г. прошла на расстоянии около 6000 км от Луны
«Пионер-4»	3 марта 1959	Изучение космического излучения в окололунном пространстве (прошел на расстоянии около 60 000 км от Луны)
«Луна-2»	12 сент. 1959	Первое достижение поверхности Луны 13 сент. 1959 в 21 ч 02 м 23 с вс. вр.
«Луна-3»	4 окт. 1959	10 окт. 1959 г. прошла на расстоянии около 6200 км от Луны. Первые фотографии невидимой с Земли стороны Луны
«Пионер-5»	11 марта 1960	Исследование космического пространства между Землей и Венерой
«Венера-1»	12 февр. 1961	Измерение космического излучения и магнитного поля в окрестностях Венеры

Продолжение

Название	Дата запуска	Задачи. Результаты
«Рейнджер-3»	26 янв. 1962	28 янв. прошел на расстоянии 37 000 км от Луны
«Рейнджер-4»	23 апр. 1962	Достижение поверхности Луны (на невидимой стороне) 26 апр. 1962 в 12 ч. 40 мин вс. вр.
«Маринер-2»	27 авг. 1962	Прошел на расстоянии 41 000 км от Венеры 14 дек. 1962
«Рейнджер-5»	18 окт. 1962	Облетел Луну, приблизившись к ней на расстояние 735 км
«Марс-1»	1 нояб. 1962	Прошел на расстоянии около 200 000 км от Марса
«Луна-4»	2 апр. 1963	6 апр. 1962 примерно в 1 ч 26 мин прошла на расстоянии 8500 км от Луны
«Рейнждер-6»	30 янв. 1964	2 февр. 1964 в 9 ч 24 мин 33 с достиг поверхности Луны в районе Моря Спокойствия
«Зонд-1»	2 апр. 1964	В июле 1964 прошел на расстоянии 100 000 км от Венеры
«Рейнджер-7»	28 июля 1964	Передав на Землю 4316 снимков поверхности Луны, 31 июля 1964 в 13 ч 25 мин 49 с достиг Луны в районе Моря Облаков
«Маринер-3»	5 нояб. 1964	Изучение планеты Марс
«Маринер-4»	28 нояб. 1964	15 июля облетел Марс на расстоянии 10000 км и передал на Землю 21 крупномасштабный снимок поверхности

Продолжение

Название	Дата запуска	Задачи. Результаты
«Зонд-2»	30 нояб. 1964	Приблизился к планете Марс в августе 1965
«Рейнджер-8»	17 февр. 1965	Передав 7137 фотографий поверхности, 20 февр. 1965 в 9 ч 57 мин достиг Луны в районе Моря Спокойствия
«Рейнджер-9»	21 марта 1965	Передав 6150 фотографий поверхности, достиг Луны в районе кратера Альфонс 24 марта 1965 в 14 ч 08 мин 20 с
«Луна-5»	9 мая 1965	12 мая 1965 в 19 ч 10 мин достигла Луны (Море Облаков)
«Луна-6»	8 июня 1965	Прошла на расстоянии 160 000 км от Луны
«Зонд-3»	18 июля 1965	Фотографирование поверхности Луны с расстояния 9220 км
«Луна-7»	4 окт. 1965	Достигла Луны (Океан Бурь) 7 окт. 1965 в 22 ч 08 мин 24 с
«Венера-2»	12 нояб. 1965	27 февр. 1966 в 02 ч 51 мин приблизилась к Венере на расстояние 24 000 км
«Венера-3»	16 нояб. 1965	1 марта 1966 в 06 ч 56 мин впервые достигла поверхности Венеры
«Луна-8»	3 дек. 1965	6 дек. 1965 в 21 ч 51 мин 30 с достигла Луны (Океан Бурь)
«Пионер-6»	16 дек. 1965	Изучение Солнца

Продолжение

Название	Дата запуска	Задачи. Результаты
«Луна-9»	31 янв. 1966	Произвела мягкую посадку на поверхность Луны и передала на Землю ряд крупномасштабных фотографий
«Луна-10»	31 марта 1966	Первый искусственный спутник Луны
«Сервейор-1»	30 мая 1966	Мягкая посадка на Луну (кратер Флемстед) 2 июня 1966; передал более 11 000 фотоснимков
«Лунар Орбитер-1»	10 авг. 1966	Искусственный спутник Луны (фотографирование поверхности)
«Пионер-7»	17 авг. 1966	Изучение Солнца (аналогично «Пионеру-6»)
«Луна-11»	24 авг. 1966	Искусственный спутник Луны
«Сервейор-2»	20 сент. 1966	23 сент. достиг поверхности Луны
«Луна-12»	22 окт. 1966	Спутник Луны (фотографирование поверхности)
«Лунар Орбитер 2»	6 нояб. 1966	Спутник Луны (фотографирование поверхности)
«Луна-13»	21 дек. 1966	24 дек. 1966 осуществила мягкую посадку на Луне (Океан Бурь) и передала снимки поверхности
«Лунар Орбитер 3»	5 февр. 1967	Спутник Луны (повторное фотографирование поверхности)
«Сервейор-3»	17 апр. 1967	20 апр. 1967 мягко сел на Луне (Океан Бурь); к 3 маю 1967 передал 6315 фотоснимков

Продолжение

Название	Дата запуска	Задачи. Результаты
«Лунар Орбитер 4»	4 мая 1967	Спутник Луны (фотографирование)
«Венера-4»	12 июня 1967	Исследовав атмосферу планеты Венера, мягко приземлилась на Венере 18 окт. 1967
«Маринер-5»	14 июня 1967	19 окт. 1967 приблизился к Венере на расстояние 3980 км
«Сервейор-4»	14 июля 1967	17 июля разбился о поверхность Луны
«Эксплорер-35»	19 июля 1967	Спутник Луны (изучение пространства между Землей и Луной)
«Лунар Орбитер 5»	1 авг. 1967	Спутник Луны (фотографирование)
«Сервейор-5»	8 сент. 1967	Мягкая посадка на Луне 11 сент. 1967; к 24 сент. 1967 передала 18 006 фотоснимков; впервые произведен анализ состава лунного грунта
«Сервейор-6»	7 нояб. 1967	Продолжение программы «Сервейора-5»; по командам с Земли передвинулся на 2 м
«Пионер-8»	13 дек. 1967	Продолжение программы «Пионеров» 6 и 7
«Сервейор-7»	7 янв. 1968	10 янв. 1968 мягко опустился на Луну в 20 км к северу от кратера Тихо; передал фотографии и произвел анализ состава лунного грунта
«Зонд-4»	2 марта 1968	Вышел на гелиоцентрическую орбиту

Продолжение

Название	Дата запуска	Задачи. Результаты
«Луна-14»	7 апр. 1968	Спутник Луны; изучение гравитационного поля Луны
«Зонд-5»	14 сент. 1968	На его борту находились живые организмы (в том числе несколько черепах); после облета Луны приземлился в Индийском океане 21 сент. 1968
«Пионер-9»	8 нояб. 1968	Прогнозирование солнечных вспышек (продолжение программы «Пионеров» 6, 7, 8)
«Зонд-6»	10 нояб. 1968	14 нояб. облетел Луну на расстоянии 2420 км и приземлился на территории СССР 17 нояб. 1968
«Венера-5»	5 янв. 1969	
«Венера-6»	10 янв 1969	
«Маринер-6»	25 февр. 1969	30 июля 1969 пролетел вблизи Марса в направлении с запада на восток и передал 77 великолепных снимков поверхности
«Маринер-7»	27 марта 1969	3 авг. 1969 пролетел над Марсом по полярной траектории и передал 124 снимка поверхности
«Зонд-7»	7 авг. 1969	Та же программа, что и у «Зонда-6»: 11 авг. облетел вокруг Луны и приземлился на территории СССР 14 авг. 1969; 8 и 11 авг. производилось фотографирование Земли и Луны; получены превосходные снимки

Таблица 3

Химический состав и температура атмосферы планет

Составляющая	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Титан (спутник Сатурна)
Ar	+	—	—	4	—	—	—	—	—
H_2	—	—	—	—	$270 \cdot 10^3$	$40 \cdot 10^3$	$135 \cdot 10^3$	$150 \cdot 10^3$	—
O_2	—	+	$1{,}68 \cdot 10^3$	*N*	—	—	—	—	—
N_2	—	—	$6{,}25 \cdot 10^3$	300	—	—	—	—	—
He	—	—	—	—	—	+	$370 \cdot 10^3$	$370 \cdot 10^3$	—
CO_2	—	Преобладание, 10^3 над облаками	2,20	50	—	—	—	—	—
H_2O	—	~70 мкм (осажд.)	Переменное количество	8—20 мкм (осажд.)	—	—	—	—	—
CO	—	—	—	*N*	—	—	—	—	—
N_2O	—	*N*	0,008	—	—	—	—	—	—
CH_4	—	*N*	0,017	*N*	150	350	$3 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	250
NH_3	—	*N*	—	*N*	7	2	—	—	*N*
SO_2	—	—	—	*N*	—	—	—	—	—
O_3	—	—	0,003	*N*	—	—	—	—	—
Температура теоретическая:									
наибольшая	625	324	349	306	131	95	67	53	119
средняя	—	229	246	216	93	68	47	38	84
наблюдаемая:									
наибольшая	613	—	314	287	—	—	—	—	—
средняя	—	700 *G* (около поверхности)	—	210	130—165 (*G*)	93	—	—	—

\+ обозначает качественные данные (присутствие).
N обозначает, что верхнего предела не установлено.
G указывает, что вследствие прозрачности атмосферы имеется сильный «парниковый» тепловой эффект.
Табличные величины даны в м·атм, т. е. слой в метрах атмосферы, которая предполагается приведенной к «стандартным» температуре и давлению.

Таблица 4

Список звезд, имеющих невидимых спутников

№	Название	π	P	a	$M/M_\odot$
1	Ближайшая Центавра	0,762	2,47	0,010	0,0018
2	Звезда Барнарда	0,530	24	0,0245	0,0015
3	BD + 36°2147 = Ла-ланд 21 185	0,398	8,0	0,0336	0,01
4	61 Лебедя	0,292	4,8	0,0102	0,008
5	Крюгер 60 A	0,249	16	$\alpha = 0{,}03$	0,009—0,025
6	BD + 20°2465	0,213	26,5	0,11	0,032
7	o^2 Эридана	0,201	2,99	0,012	0,029
8	70 Змееносца	0,193	17	0,015	0,008—0,012
			9,89	0,014	0,012—0,015
9	Ci 2354	0,184	10,8	0,028	$\geqslant 0{,}02$
10	ξ Волопаса	0,145	2,2	0,02	0,1
11	ν Геркулеса	0,117	8 или 16	0,5 или 0,15	—
12	Росс 434	0,064	1,3	0,038	—
13	δ Орла	0,062	3,4	0,05	0,5 ... 0,8
14	BD + 11°2625	0,061	12,4	0,15	—
15	ξ Водолея	0,040	25	0,08	0,6
16	16 Лебедя A	0,039	1,61	0,012	—
17	16 Лебедя B	0,039	1,59	0,031	—
18	ξ Рака C	0,039	17,5	0,191	0,9
19	μ Дракона	0,033	3,2	0,026	0,6

π — тригонометрический параллакс в секундах дуги.
a — видимая большая полуось возмущенной основной составляющей, в секундах дуги.
α — видимая амплитуда колебаний по прямому восхождению, в секундах дуги.
P — период обращения в годах.
M — масса спутника ($M_{\text{Юпитера}} \approx 0{,}001\ M_\odot$).

Таблица 5

Солнце

Диаметр $2R = 1{,}3920 \cdot 10^{11}$ см
Масса $M = 1{,}989 \cdot 10^{33}$ г

Вращение вокруг оси (сидерическое):

$\lambda = 0°$ 14,5° в 1 сут (экватор)
$\lambda = 45°$ 13,2° в 1 сут
$\lambda = 90°$ 11,8° в 1 сут (полюс)

Таблица 6

Солнечная система

Планета	Спутники (не все)	Диаметр, км	Масса, г	Большая полуось орбиты, 10^6 км	Период обращения	Период вращения, часы, сутки	Примечания
Меркурий ☿	(Нет)	4 840	$3{,}333 \cdot 10^{26}$	57,9	0,240 год	59 сут	Атмосферы нет
Венера ♀	(Нет)	12 228	$4{,}870 \cdot 10^{27}$	108,2	0,615 год	242,9 сут	Мощная облачная атмосфера (в основном CO_2)
Земля ♁	—	12 742	$5{,}976 \cdot 10^{27}$	149,6	1,000 год	23 ч 56 мин 4,09 с	Имеется атмосфера
⊕	Луна	3 476	$7{,}35 \cdot 10^{25}$	0,3844	27,321661 сут	27,3 сут	Атмосферы нет
Марс ♂	—	6 770	$6{,}443 \cdot 10^{26}$	227,9	1,881 год	24 ч 37 мин 22,668 с	Разреженная атмосфера (в основном CO_2)
	Деймос	(15)	?	0,02352	1,262 сут	—	
	Фобос	(10)	?	0,00937	0,3189 сут	—	
Юпитер ♃	12 спутников в том числе:	140 720	$1{,}8993 \cdot 10^{30}$	778	11,862 год	9 ч 50 мин — 9 ч 56 мин	Плотная атмосфера, многоатомные молекулы (NH_3, CH_4)
	Ио	35 550	$7{,}2 \cdot 10^{25}$	0,422	1,769 сут	—	
	Европа	3 100	$4{,}7 \cdot 10^{25}$	0,671	3,551 сут	—	
	Ганимед	5 600	$15{,}5 \cdot 10^{25}$	1,070	7,155 сут	—	
	Каллисто	5 050	$9{,}7 \cdot 10^{25}$	1,880	16,689 сут	—	
Сатурн ♄	10 спутников в том числе:	116 820	$5{,}684 \cdot 10^{29}$	1427	29,456 год	10 ч 14 мин — 10 ч 40 мин	Плотная атмосфера; Сатурн обладает системой колец, лежащих почти в плоскости экватора
	Тетис	1 000	$6{,}5 \cdot 10^{23}$	0,295	1,888 сут	—	
	Диона	—	$1{,}0 \cdot 10^{24}$	0,377	2,737 сут	—	
	Титан	4 950	$1{,}4 \cdot 10^{26}$	1,222	15,95 сут	—	
Уран ♅	5 спутников в том числе:	47 100	$8{,}676 \cdot 10^{28}$	2870	84,015 год	10 ч 45 мин	Атмосфера
	Ариэль	—	—	0,192	2,520 сут	—	
	Умбриэль	—	—	0,267	4,144 сут	—	
Нептун ♆	(2 спутника)	44 600	$1{,}029 \cdot 10^{29}$	4496	164,788 год	15,8 ч	
Плутон ♇	(Нет)	6 000	$5{,}53 \cdot 10^{27}$	(5900)	247,7 год	6,39 сут	

ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ЧТЕНИЯ

Читатель, который заинтересуется более глубоким изучением космических исследований, может обратиться к многочисленной литературе.

Результаты исследования околоземного космического пространства, межпланетного пространства, солнечной системы и более далеких объектов публикуются в журналах «Доклады АН СССР», «Космические исследования», «Астрономический журнал», «Геомагнетизм и аэрономия».

Более популярное изложение тех же вопросов читатель найдет в журналах «Земля и вселенная», а также «Природа».

Для коротких справок лучше всего обратиться к Реферативному журналу «Астрономия и космические исследования», издаваемому ВИНИТИ. Тот же институт периодически выпускает сборник «Итоги науки», содержащие обзоры исследований по тем или иным проблемам (Солнце, планеты, межпланетная среда и т. д.).

Читателю, пожелающему более глубоко познакомиться с законами движения искусственных небесных тел, лучше всего обратиться к книгам:

Левантовский В. И., Космонавтика в элементарном изложении, М., «Наука», 1970.

Кинг-Хили Д., Наблюдая спутники Земли, М., «Мир», 1968.

Эскобал П., Методы астродинамики, М., «Мир», 1971.

Для углубленного изучения небесной механики можно порекомендовать руководство:

Дубошин Г. Н., Курс небесной механики, ч. I—V, М., «Наука».

Результаты исследования Луны и планет при помощи наземных методов и космических аппаратов описаны в следующих книгах:

Каула У., Введение в физику планет земной группы, М., «Мир», 1971.

Вуд Дж., Метеориты и происхождение солнечной системы, М., «Мир», 1971.

С новыми направлениями в астрофизике читатель может познакомиться по книге:

Уикс Т., Астрофизика высоких энергий, М., «Мир», 1972.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора перевода 5

Предисловие 9

Глава I. АСТРОНОМИЯ — ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ НАУКА? 13

1. Огюст Конт и астрономия 13
2. Наблюдатель — еще и экспериментатор 17
3. Численное экспериментирование 20
4. Заключение. Рождение космической астрономии 22

Глава II. ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ КАК НЕБЕСНЫЕ ТЕЛА, ИЛИ ВВЕДЕНИЕ В «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНУЮ НЕБЕСНУЮ МЕХАНИКУ» 24

1. Закон всемирного тяготения 25
2. Потенциал сферического тела 27
3. Численное исследование простого случая круговой орбиты 29
4. Некруговые кеплеровские орбиты искусственных спутников 33
5. Возмущения кеплеровских орбит 41
6. Подробное исследование гравитационных возмущений . 45
7. Негравитационные возмущения 51
8. Наблюдение спутников и анализ измерений 55

Глава III. ВВЕДЕНИЕ В АСТРОНАВТИКУ 65

1. Переходные орбиты 65
2. К Венере и Марсу 72
3. Применение двойных маневров 75
4. Сложные орбиты 78
5. Влияние ошибок выведения 80
6. Заключение 81

Глава IV. ЧТО ТАКОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИКА? 83

Глава V. ПРЯМЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНЕЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА 87
1. Прямое исследование Луны 87
2. Исследование Марса 104
3. Исследование Венеры 106
4. Метеоритные частицы и пыль 106

Глава VI. МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ОБИТАЕМЫХ МИРОВ . . 107
1. С Фонтенелем и его Маркизой 107
2. Жизнь и биосфера 113
3. Солнечная система 116
4. Другие планетные системы во вселенной 125
5. Проект Озма 136
6. Невероятное, вероятное, возможное и бессмысленное . . 139

Заключение. ПОСЛЕ ДЕСЯТИ ЛЕТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ 143

Литература для дальнейшего чтения 162

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и др. просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д. 2, изд-во «Мир».

Ж.-К. Пекер

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
АСТРОНОМИЯ

Редактор *Л. В. Самсоненко*
Художник *Ю. С. Урманчеев*
Художественный редактор
Н. А. Шаврова
Технический редактор
Е. С. Потапенкова
Корректор *О. К. Румянцева*

Сдано в набор 30/I 1973 г.
Подписано к печати 24/IV 1973 г.
Бумага тип. № 2 84×108¹/₃₂=2,63 бум. л.
8,82 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 7,86
Изд. № 27/7036. Зак. № 518
Цена 37 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградская типография № 2
имени Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома
при Государственном комитете
Совета Министров СССР
по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли
г. Ленинград, Л-52,
Измайловский проспект, 29

В 1973 г.
издательство «Мир» выпускает книгу

Р. Тейлор
СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

Небольшая по объему книга знакомит читателя с современными данными о происхождении, строении и дальнейшей судьбе звезд. Она открывается основными данными наблюдений, лежащими в основе теории звездной эволюции. Далее рассмотрены важнейшие физические процессы, определяющие строение звезд и выделение энергии в их недрах. Следующий раздел посвящен знакомству с Солнцем. Затем идет рассказ о заключительных этапах эволюции звезд типа Солнца — красных гигантах и белых карликах, а также гравитационном коллапсе.

Книга рассчитана на широкие круги читателей-неспециалистов, интересующихся проблемами науки.

В 1973 г.
издательство «Мир» выпускает книгу

Д. Шама
СОВРЕМЕННАЯ КОСМОЛОГИЯ

Как устроена Вселенная? Этот вопрос задавали себе наши предки, он интересует нас, и на него будут искать ответ наши далекие потомки, ибо это один из основных вопросов науки, который является предметом особой отрасли астрономии — космологии, тесно связанной с физикой, в частности с теорией относительности Эйнштейна.

Познакомить читателя с основами современной космологии — такую задачу поставил перед собой известный английский ученый Д. Шама. Он рассматривает физические принципы космологии, теорию тяготения, постановку космологической задачи, современные представления о структуре и эволюции Вселенной в целом и составляющих ее объектов, наблюдательные подтверждения различных космологических теорий.

Книга рассчитана на читателей со средним образованием, на преподавателей физики в школах и вузах. Она будет также полезна студентам младших курсов, а также лицам с гуманитарным образованием, интересующимся естественно-научными вопросами.

Б54423

37 коп.

Д4
3284